

Experimentos para o ensino de eletrostática com auxílio computadorizado

(CAD experiments for teaching electrostatic)

Antônio Flavio Licarião Nogueira¹

Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, SC, Brasil

Recebido em 14/3/2006; Aceito em 13/4/2006

O artigo descreve um experimento para o ensino de eletrostática utilizando programas para cálculo de campos baseados na técnica dos elementos finitos. Avalia as dificuldades de acesso aos programas de simulação de campos. Inclui uma série de recomendações relativas à escolha e preparação dos experimentos que compõem um laboratório para simulação de campos. Utiliza diferentes configurações de um capacitor de placas planas e paralelas para inspecionar fenômenos localizados e calcular grandezas globais. Um estudo comparativo de métodos analíticos e numéricos para cálculo de capacitância e força eletrostática é apresentado.

Palavras-chave: capacitância, método dos elementos finitos, programas de simulação.

The paper describes a CAD experiment for teaching electrostatic using field simulators based on finite element methods. Difficulties related to accessibility of the field simulation software accessibility are addressed. Recommendations on the choice and preparation of the experiments are given. Different configurations of a flat parallel-plate capacitor are used to probe local phenomena and compute global characteristics. A comparison study of analytical and numerical methods for the calculation of capacitance and electrostatic force is included.

Keywords: capacitance, finite element methods, simulation software.

1. Introdução

O desenvolvimento de projetos e a construção de dispositivos eletromagnéticos são processos complexos e altamente competitivos. Desde a década de 1980, um número expressivo de fabricantes de equipamentos elétricos e centros de pesquisa faz uso de sistemas informáticos para cálculo de campos eletromagnéticos. Em sua grande maioria, esses sistemas usam a técnica dos elementos finitos e estão inseridos dentro da filosofia de projeto com auxílio computadorizado ou, simplesmente, filosofia *CAD* (*Computer-Aided Design*) [1-2]. A palavra *design*, inserida nessa sigla, enfatiza a importância desses sistemas no desenvolvimento de projetos.

A diversidade e crescente complexidade de dispositivos eletromagnéticos é um estímulo para se investir em programas e treinamentos voltados para a efetiva utilização das ferramentas modernas de simulação de campos. A realização desses cursos e treinamentos depende muito da infra-estrutura e condições de trabalho da instituição. Em muitos casos, precisam ser criadas parcerias com outras instituições ou grupos acadêmicos mais bem estruturados para viabilizar, tanto o acesso

aos programas de simulação quanto o treinamento de futuros instrutores.

Atualmente, existem vários programas para o cálculo de campos eletromagnéticos usando a técnica de elementos finitos - daqui por diante referidos como simuladores de campo - cujas licenças para utilização, suporte técnico e atualização periódica são obtidas por um preço bastante elevado, que pode chegar à ordem de dezenas de milhares de dólares. Algumas empresas reduzem consideravelmente os custos das licenças quando há comprovação de que os programas são utilizados tão somente como ferramentas de ensino e pesquisa científica. A utilização dos programas em microcomputadores ligados em rede é um quesito que, às vezes, também reduz os custos da licença. Existem ainda empresas e centros de pesquisa que disponibilizam uma versão didática similar à versão completa, limitada somente no número de pontos nodais e correspondentes elementos geométricos que compõem a malha usada para modelar os problemas [3].

Seguindo a tendência de oferecer, através de seus programas, um serviço a uma comunidade de usuários cada vez maior, algumas empresas especializadas no desenvolvimento de ferramentas computacionais para

¹E-mail: antonio.flavio.nogue@terra.com.br.

o projeto e otimização de equipamentos elétricos começam a incluir versões gratuitas de alguns de seus programas em suas páginas na Internet, sem qualquer restrição de desempenho e acompanhadas de extensa documentação [4]. Também inserida nesse contexto está a suíte de programas gratuitos conhecida popularmente como FEMM [5] e utilizada no presente trabalho para a solução dos problemas propostos.

É no contexto dessas considerações que se pode criar um ambiente experimental para a simulação de campos e, com isso, dinamizar o ensino do eletromagnetismo, considerado um dos assuntos mais abstratos e difíceis dos cursos de física e engenharia elétrica. Os critérios utilizados na escolha e elaboração dos experimentos que compõem o treinamento em laboratório são apresentados em seguida. Partindo-se de um experimento sobre cálculos eletrostáticos, procura-se mostrar como é possível analisar um número considerável de variáveis de projeto utilizando um dispositivo extremamente simples.

2. O laboratório de simulação

O planejamento das atividades em laboratório deve levar em conta aspectos qualitativos e quantitativos. O treinamento tem como principal objetivo o desenvolvimento de familiaridade na utilização das ferramentas de simulação de campos. Por isso, a escolha do conjunto de problemas de teste que compõem o treinamento assume um papel muito importante no processo. Essa escolha pode conduzir a conclusões simplistas ou particulares, associadas a um determinado número de dispositivos. Isso pode ser o resultado da escolha de um número muito reduzido de problemas de teste. Por outro lado, a escolha indiscriminada de um número muito grande de problemas pode resultar em uma atividade repetitiva e dispendiosa. Do ponto de vista didático, um dos aspectos mais valiosos da simulação numérica é a facilidade de analisar diferentes aspectos físicos e operacionais de um mesmo dispositivo através da introdução de alterações na configuração básica.

A preparação de um laboratório não convencional deve considerar, em primeiro lugar, a classe de usuários a que se destina. Um conjunto de experimentos com diferentes problemas de teste voltados para o ensino deve incorporar técnicas e métodos que representam as inovações da área específica, bem como métodos analíticos, quer na sua forma tradicional quer sob forma refinada. Os métodos tradicionais podem não ser muito precisos e ter aplicações limitadas a determinadas configurações geométricas ou operacionais do dispositivo, mas apresentam uma série de vantagens. Em geral, são baseados em equações simples e que produzem estimativas em um tempo relativamente pequeno. Na maioria dos casos essas estimativas são de fácil interpretação e muito úteis na comparação de desempenho de variáveis correlacionadas. Em qualquer caso, os valores obti-

dos da simulação numérica precisam ser quantificados e comparados com valores de referência obtidos experimentalmente ou através de métodos analíticos. Esses métodos podem ser utilizados em trabalhos de pesquisa elementar para produzir aproximações dos resultados obtidos através da análise mais elaborada baseada em simulação numérica. É o caso do excelente trabalho de validação de cálculos eletrostáticos apresentado por Meeker [6].

A simulação numérica, ao mesmo tempo em que gera resultados com rapidez, facilmente acomoda novas situações de projeto, e isso dificilmente acontece com os métodos tradicionais. Tome-se como exemplo o estudo de diferentes configurações de um capacitor coaxial cilíndrico, usualmente considerado um problema de abordagem fácil, tanto analítica como numericamente. Os efeitos da remoção da simetria de sua seção transversal para estudo de configurações excêntricas podem ser analisados através de transformações espaciais que geram resultados precisos, mas de difícil interpretação [7]. A solução por métodos analíticos ou semi-analíticos do capacitor coaxial se torna ainda mais complexa quando se investiga os efeitos resultantes do deslocamento de um dos eletrodos na direção longitudinal. A simulação de campo, por outro lado, permite que tais variações do problema sejam facilmente analisadas. No segundo problema, a utilização de recursos para análise de estruturas axissimétricas permite, inclusive, visualizar e quantificar com grande precisão os efeitos das extremidades.

3. Capacitância e grandezas correlacionadas

3.1. Formulação teórica

A abordagem numérica para cálculo da capacitância proposta por Lowther e Silvester [8] inclui dois métodos. O primeiro método requer o cálculo da energia armazenada, o outro requer o cálculo da carga de um dos eletrodos. Se a definição é em termos da relação entre a carga Q e a diferença de potencial V , entre os eletrodos, tem-se

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (1)$$

Se a capacitância é definida com base na energia elétrica armazenada W , tem-se

$$C = \frac{2W}{V^2}. \quad (2)$$

A carga total de um dos eletrodos, Q , é calculada pela lei de Gauss

$$Q = \oint \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dS. \quad (3)$$

Na equação acima, S é uma superfície que envolve completamente um dos eletrodos, \mathbf{D} é a densidade de fluxo elétrico e \mathbf{n} é o vetor unitário normal à superfície.

A discussão que se segue diz respeito a capacitores de placas planas e paralelas.

O cálculo analítico da capacitância é feito em função das dimensões geométricas e da permissividade do meio. Para o caso de um capacitor de placas paralelas de área A e com o espaço d entre os eletrodos preenchido por um único meio dielétrico, a capacitância é

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (4)$$

onde ϵ_r é a permissividade relativa do meio dielétrico e $\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12}$ F/m é permissividade do vácuo. Para a permissividade do ar, deve-se multiplicar ϵ_0 pela permissividade relativa do ar que é 1,00054 a 20 °C e 760 mmHg. Em capacitores com dois ou mais meios dielétricos é necessário calcular a capacitância equivalente através da associação da capacitância das camadas que formam o dispositivo.

Além da capacitância, outra grandeza global de interesse em sistemas eletrostáticos é a força eletrostática que atua em uma dada parte do dispositivo [9]. No presente trabalho, as abordagens numérica e analítica para os cálculos de força são baseadas no método do tensor de Maxwell em função de seu fácil entendimento e implementação.

A força calculada pelo tensor de Maxwell é o resultado da integração da pressão produzida pelo campo elétrico sobre uma superfície S . O elemento diferencial de pressão é

$$dF = \epsilon (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{E} - \left(\frac{\epsilon \mathbf{E}^2}{2} \right) \mathbf{n}, \quad (5)$$

onde \mathbf{n} denota a direção normal à superfície [9]-[10]. Essa superfície deve ser definida na camada de ar que envolve um dos eletrodos e pode também ser usada para calcular a carga pela lei de Gauss. Na análise bidimensional, a integral de superfície se reduz a uma integral de linha e a força líquida agindo sobre a parte de interesse é o resultado da integração ao longo de um contorno fechado. O programa utilizado leva em conta a profundidade do dispositivo e calcula a força total que age na região de interesse. O cálculo analítico da força baseia-se na aplicação mais simples do método do tensor de Maxwell. Trata-se de um caso particular onde a componente tangencial do campo elétrico ao longo do contorno utilizado é desprezível ou mesmo nula. No caso do capacitor de placas planas, a força por unidade de profundidade pode ser calculada por uma simples integral de linha ao longo de um segmento retilíneo de comprimento l igual à largura das placas e definido na camada de ar entre as mesmas

$$f = \int \frac{\epsilon_0 \mathbf{E}^2}{2} dl. \quad (6)$$

Na equação acima, o integrando representa a densidade de energia que, no caso, pode ser admitida como

constante na região entre as placas. Não há, pois, necessidade de se efetuar a integração e a força líquida total, F , é calculada pela seguinte expressão simplificada

$$F = \frac{\epsilon_0 \mathbf{E}^2}{2} z l, \quad (7)$$

onde z representa a profundidade das placas.

3.2. Problema de teste e modelo numérico

O problema de teste consiste de um capacitor de placas planas e paralelas, energizado com uma diferença de potencial bastante alta. Esse nível elevado da diferença de potencial é escolhido propositalmente de maneira que a intensidade do campo elétrico atinge o nível da rigidez dielétrica do ar para uma dada configuração do dispositivo. A idéia é fazer uma análise detalhada das distribuições de energias, potenciais eletrostáticos e campos elétricos, seguida de um estudo comparativo dos dois métodos de cálculo da capacitância para duas configurações do espaço entre as placas. O estudo comparativo e as dimensões geométricas do dispositivo ilustrado na Fig. 1 são propostos na obra de Lowther e Silvester [8]. Na primeira configuração do dispositivo – configuração 1 - o espaço entre as placas é completamente preenchido pelo ar. Na segunda configuração, a metade inferior do volume do capacitor é ocupada por um bastão dielétrico com permissividade 20 vezes maior que a do ar.

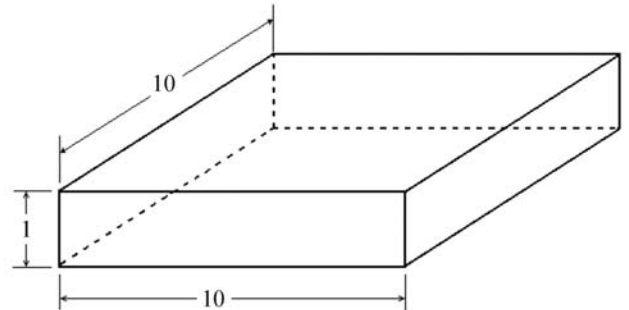


Figura 1 - Geometria do capacitor, dimensões em cm.

O modelo numérico do problema utiliza uma malha com 329 pontos nodais e 620 elementos finitos triangulares de primeira ordem, como ilustrado na Fig. 2. Para modelar a distribuição dos campos vetoriais \mathbf{E} e \mathbf{D} na região externa ao capacitor, utiliza-se condições de contorno assintóticas. Para tal, define-se um círculo de raio r que envolve completamente o dispositivo. O objeto de interesse, no caso o capacitor, deve ficar situado aproximadamente na região central desse círculo que faz o papel de uma fronteira remota. Diferentemente das técnicas baseadas no truncamento de fronteiras externas, o círculo associado às condições assintóticas não precisa estar muito afastado do dispositivo em estudo, como mostra o trabalho de Chen, Konrad e Biringer [11]. No presente modelo numérico, o centro do círculo

coincide com o centróide da face frontal do capacitor e, nesse caso, o raio precisa ser maior que a distância entre esse centro e a extremidade de um dos eletrodos, ou seja, aproximadamente 5,1 cm. Na implementação, utiliza-se um raio bem maior, com 10,0 cm de comprimento. Isso facilita a inspeção visual dos resultados no que diz respeito à simetria da distribuição de potenciais, bem como a ilustração do fenômeno de dispersão [12].

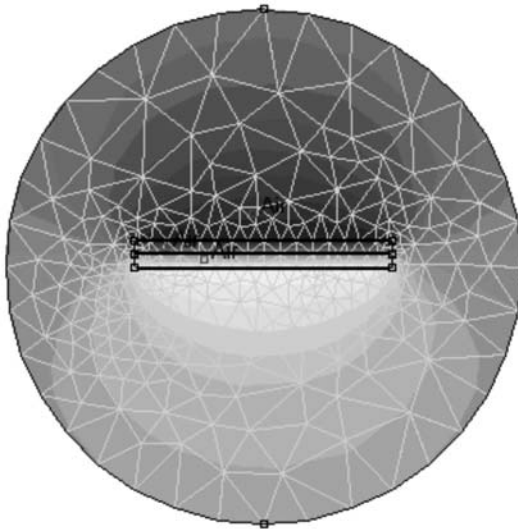


Figura 2 - Modelo numérico utilizando elementos finitos.

Os potenciais das placas superior e inferior são especificados em +7,5 kV e -7,5 kV, respectivamente. A região entre as placas é formada a partir da união de duas regiões bem delimitadas e que ocupam metade do espaço entre as mesmas. Dessa forma, a mesma malha é utilizada para modelar as duas configurações do capacitor, bastando no segundo caso alterar a permissividade do material da região inferior.

3.3. Potencial eletrostático e campo elétrico

A análise da distribuição de potenciais e campos vetoriais em dispositivos eletromagnéticos é enormemente facilitada pela inspeção visual. Nas figuras que se seguem, os segmentos retilíneos que representam as duas camadas do capacitor e suas bordas são apresentados na cor branca. A Fig. 3 mostra o traçado das equipotenciais, acompanhado do mapeamento da intensidade do potencial eletrostático para a primeira configuração do capacitor. Nesse tipo de mapeamento, maiores valores da grandeza – no caso o potencial eletrostático – são associados a tons mais acentuados da cor cinza. A figura mostra que o traçado das equipotenciais é coerente com o entendimento físico do problema e ilustra com clareza o efeito da dispersão de campo, esse representado pelo aumento da separação entre as equipotenciais nas regiões mais afastadas das placas planas. Como resultado da condição de contorno assintótica aplicada ao círculo externo, quatro linhas equipotenciais parecem

cruzar essa fronteira como se o domínio da solução se estendesse além desse círculo. Com o auxílio da legenda é possível observar que o potencial eletrostático varia na faixa de +7,5 kV a -7,5 kV, o que está de acordo com as especificações do problema.

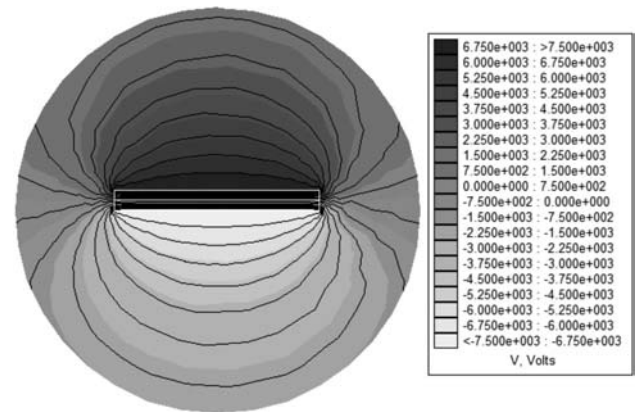


Figura 3 - Equipotenciais e potencial eletrostático, configuração 1.

Para inspeção da distribuição do campo elétrico, as regiões próximas às bordas são as mais importantes. São regiões onde a densidade de energia apresenta variações substanciais em relação à posição e onde ocorrem os campos elétricos mais intensos. A Fig. 4 apresenta uma vista ampliada de uma pequena região próxima à borda esquerda com o correspondente traçado das equipotenciais e mapeamento da intensidade do campo elétrico. Os campos mais intensos variam na faixa de $1,766 \times 10^6$ a $1,858 \times 10^6$ V/m, mostrando que a rigidez dielétrica do ar não é atingida em nenhum ponto do domínio em estudo. O mapeamento também mostra que, exceto nas proximidades da borda, a intensidade da cor cinza da região entre os eletrodos não muda, indicando que a magnitude do campo elétrico é praticamente constante. Isso também pode ser observado com o auxílio de gráficos que mostram a variação do campo elétrico ao longo de contornos definidos nas regiões de interesse. O contorno vertical *AB* mostrado na Fig. 4 está distante exatamente $\frac{1}{2}$ cm da borda esquerda. A inspeção da variação do campo elétrico ao longo desse contorno mostra que a intensidade do mesmo é praticamente constante e da ordem de $1,50 \times 10^6$ V/m. Nessa região, também a densidade de energia é praticamente constante e da ordem de $10,0 \text{ J/m}^3$ para qualquer ponto inspecionado.

A análise de dados para a segunda configuração do capacitor também começa com a inspeção do potencial. A Fig. 5 mostra o gráfico da variação do potencial ao longo do mesmo contorno vertical *AB* apresentado na Fig. 4.

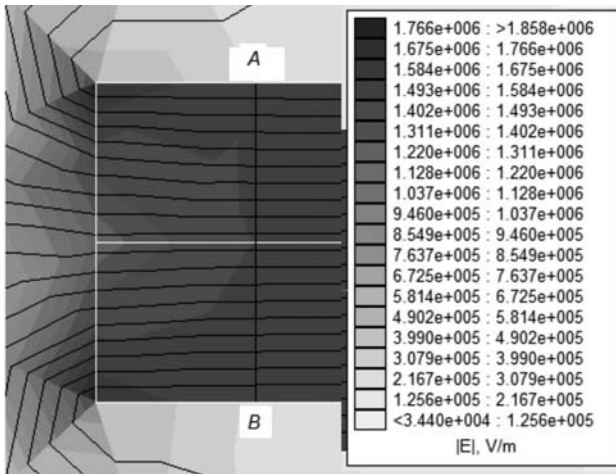


Figura 4 - Equipotenciais e campo elétrico, configuração 1.

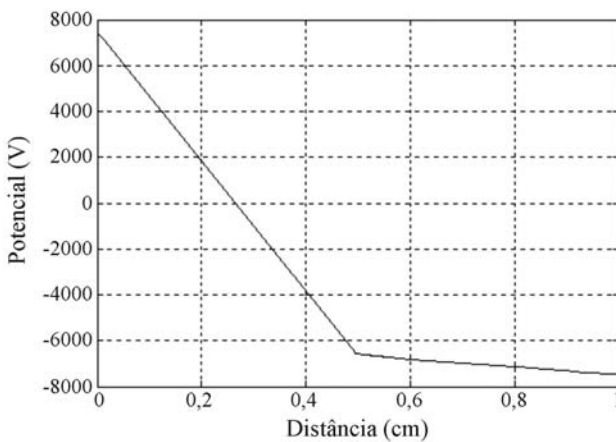


Figura 5 - Variação do potencial, configuração 2.

O gráfico mostra uma variação acentuada do potencial ao longo da camada de ar, que ocupa a metade superior do espaço entre as placas. Ao longo dessa camada de comprimento de $1/2$ cm o potencial varia de +7,50 kV até -6,77 kV, totalizando uma queda de potencial de 14,27 kV. Ou seja, 95% da queda de potencial ocorre na camada de ar.

A Fig. 6 é uma vista ampliada da porção esquerda do capacitor de duas camadas. Inclui o traçado das equipotenciais e mapeamento da intensidade do campo elétrico.

O mapeamento ilustra o enfraquecimento do campo elétrico no volume ocupado pelo bastão dielétrico, um fenômeno decorrente da polarização desse dielétrico. Na camada ocupada pelo ar, o campo elétrico é intenso

e praticamente constante, variando na estreita faixa de $2,877 \times 10^6$ a $3,026 \times 10^6$ V/m. É importante observar que, para essa configuração do dispositivo, o campo elétrico próximo às bordas do eletrodo superior atinge o nível da rigidez dielétrica do ar. Isso mostra que, para uma operação segura, a diferença de potencial aplicada no capacitor de dupla camada precisa ser reduzida para um valor abaixo de 15,0 kV.

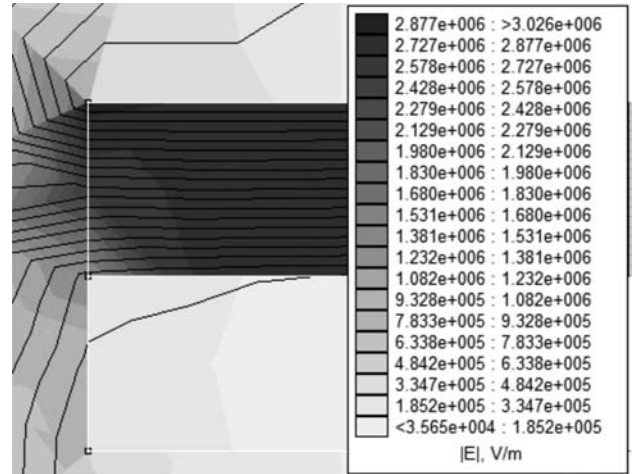


Figura 6 - Equipotenciais e campo elétrico, configuração 2.

3.4. Capacitância, energia e força

A discussão dos resultados inclui dados comparativos relacionados às duas configurações do capacitor de placas planas, bem como valores obtidos por métodos numéricos e analíticos para diferentes parâmetros de projeto. A Fig. 7 mostra o contorno de integração utilizado para os cálculos de carga e força.

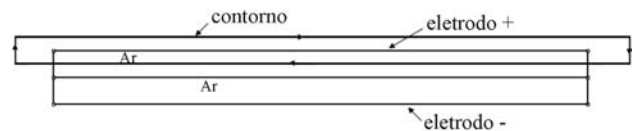


Figura 7 - Contorno de integração.

A Tabela 1 apresenta os valores das capacitâncias calculadas analiticamente e pelos dois métodos numéricos. Os resultados mostram que, para as duas configurações do capacitor em questão, os valores calculados analiticamente são subestimados e que os dois métodos numéricos para cálculo da capacitância são computacionalmente equivalentes.

Tabela 1 - Capacitâncias.

	Capacitância (pF)		
	Método analítico	Método da energia	Método da carga
Configuração 1	8,85	10,55	10,66
Configuração 2	16,87	18,99	19,07

Em relação às duas configurações do capacitor analisado, observa-se também que a utilização de um bastão isolante com alta permissividade ($\varepsilon = 20\varepsilon_0$) na metade do espaço entre as placas produziu, em média, um aumento de 80% na capacitância e variáveis correlacionadas, a saber: carga elétrica e energia total armazenada, como mostrado nas Tabelas 1 e 2.

Os valores das capacitâncias calculadas numericamente

são, em média, 20% e 13% maiores que os calculados analiticamente para as configurações 1 e 2, respectivamente. Observa-se, com o auxílio da Tabela 2, que esses percentuais representam, aproximadamente, a fração da energia armazenada nos campos dispersos em relação à energia total do sistema para as duas configurações. Isso explica porque os valores da capacitância obtidos analiticamente são subestimados.

Tabela 2 - Energia armazenada e carga elétrica.

	Energia entre placas (mJ)	Energia do campo disperso (mJ)	Energia total (mJ)	Carga (μC)
Configuração 1	0,997	0,190	1,187	0,159
Configuração 2	1,902	0,235	2,137	0,286

Do ponto de vista de armazenamento energético observa-se que no capacitor de dupla camada a energia armazenada entre as placas é 1,902 mJ. Essa energia é distribuída de forma que 1,798 mJ e 0,104 mJ são armazenados nas camadas superior e inferior, respectivamente. Ou seja, a energia armazenada na camada de ar é aproximadamente 17 vezes maior que a correspondente no bastão dielétrico. No entanto, a energia total armazenada no capacitor de dupla camada é 2,137 mJ contra 1,187 mJ do capacitor de ar, ou seja, 80% maior.

Os resultados associados aos cálculos da força de atração entre as placas, calculada analítica e numericamente são apresentados na Tabela 3. Os resultados mostram que, para esse dispositivo em particular, a fórmula analítica gera boas estimativas do valor mais preciso calculado numericamente. O cálculo da força pelo método numérico é mais preciso, pois, ao contrário do cálculo analítico, leva em conta as variações da densidade de energia que de fato ocorrem ao longo do contorno de integração. Vale ressaltar que uma fração da força total é devida à pressão exercida pelos campos dispersos e transmitida em regiões que circundam as bordas do capacitor. Caso o contorno definido não seja fechado, como no caso de um segmento retilíneo paralelo às placas, é necessário que o mesmo se prolongue além dos limites geométricos do dispositivo.

Tabela 3 - Força entre as placas.

	Força (mN)		
	Método numérico	Método analítico	Erro
Configuração 1	103,320	99,475	3,7%
Configuração 2	370,020	361,620	2,3%

No caso do capacitor de dupla camada, a força elétrica é, em média, 179% maior que aquela do capacitor completamente preenchido pelo ar. Esse aumento substancial está de acordo com o entendimento de que a pressão que produz a força é transmitida no ar e varia

com o quadrado da intensidade dos campos **E** e **D**. A presença de um bastão de alta permissividade na parte inferior provoca, na outra camada, um aumento na concentração de energia e correspondentes intensidades dos campos **E** e **D**.

3.5. Sugestão de trabalhos afins

Partindo-se do modelo numérico do capacitor de placas planas e paralelas, é possível analisar como a capacitância e variáveis correlacionadas são afetadas quando se implementam alterações como:

- Remoção do paralelismo entre as placas, decorrente de uma rotação, no sentido horário, da placa superior em relação ao eixo horizontal. Na abordagem analítica proposta por Bertuola e Figueiredo [13], a configuração não paralela é aproximada pela associação paralela de um grande número de pequenos capacitores cujas placas superiores compõem uma escada usada como representação discreta da placa inclinada. Cada capacitor elementar é paralelo à placa inferior. A área dos capacitores elementares é parametrizada e reduz em função do aumento do número de capacitores paralelos utilizados. O espaçamento entre as placas de cada capacitor elementar é reduzido da esquerda para a direita de um pequeno incremento posicional. O desenvolvimento analítico leva a uma fórmula de recorrência para o cálculo da capacitância. Para validação desses cálculos analíticos, o cálculo numérico da capacitância deve considerar somente a energia armazenada no espaço intereletródico.
- Uso da Transformação de Kelvin para modelar a região externa. Trata-se de ferramenta valiosa para visualizar e quantificar com alta precisão os efeitos dos campos na região entre o dispositivo

e o infinito. Em alguns simuladores, essa transformação pode ser implementada com um mínimo de interferência do usuário. O modelamento de fronteiras remotas em problemas de eletromagnetismo é abordado em um grande número de artigos científicos. Dentre as várias possibilidades, o trabalho de Freeman e Lowther [14] é recomendado em função da clareza com que descreve diferentes aplicações das técnicas de mapeamento de campos.

4. Conclusões

O artigo reflete a experiência adquirida na criação de um laboratório para o ensino do cálculo de campos eletromagnéticos utilizando ferramentas computacionais. A dificuldade de acesso aos simuladores de campo tem reduzido nos últimos anos e isso é um estímulo para a preparação de cursos e treinamentos práticos sobre cálculo de campos em universidades e empresas de engenharia. A incorporação de uma disciplina prática de cálculo de campos no currículo de engenharia elétrica é um investimento pedagógico na disciplina de eletromagnetismo, normalmente associada a altos índices de evasão e reprovação. Quando se considera a realidade das universidades dos países em desenvolvimento, a relevância do investimento fica ainda mais clara porque a simulação de campos já faz parte das atividades de pesquisa de empresas de engenharia que cobram de seus estagiários e futuros empregados um mínimo de familiaridade na utilização dessas ferramentas.

Várias são as recomendações relativas à escolha e preparação dos experimentos que compõem um laboratório de simulação de campos. A importância das modernas ferramentas de simulação não pode ser superestimada e métodos analíticos também devem ser utilizados na abordagem dos problemas de teste. Esses métodos devem ser incluídos na fundamentação teórica e utilizados na geração de dados comparativos bem como na validação dos resultados obtidos numericamente. Com relação à abordagem numérica, vale ressaltar a importância de se criar um modelo numérico flexível, que facilite alterações das configurações do dispositivo em estudo. Essa flexibilidade é conseguida com um planejamento adequado do modelo.

O experimento intitulado “capacitância e grandezas correlacionadas” é o primeiro de uma série de seis ex-

perimentos que compõem uma disciplina prática para o ensino de cálculo de campos.

Agradecimentos

A David Meeker e equipe (dmeeker@foster-miller.com) por compartilharem a suíte de programas FEMM/TRIANGLE/LUA com estudantes e pesquisadores de todo o mundo.

Referências

- [1] E.S. Hamdi and A.F. Licarião-Nogueira, in Proceedings Intern. AMSE Conference Signals, Data & Systems, New Delhi, 1991, v. 3, p. 111-118.
- [2] J.P.A. Bastos, *Eletromagnetismo e Cálculo de Campos* (Editora da UFSC, Florianópolis, 1992), 2ªed, p. 404-442.
- [3] *Electromagnetic Fields Computer-Aided Design*, version 6.0, user's manual. Available: <http://www.grucad.ufsc.br> (2002).
- [4] *Magnet Trial Edition*, Infolytica Corporation. Available: <http://www.infolytica.com> (2006).
- [5] D. Meeker, *Finite Element Method Magnetics*, version 3.2, user's manual. Available: <http://femm.berlios.de> (2002).
- [6] D. Meeker, *Basic Electrostatic Analysis Tutorial*. Available: <http://femm.berlios.de/bela.htm> (2003).
- [7] R.E. de Carvalho e A.N.M.A. da Silva, Rev. Bras. Ens. Fis. **24**, 290 (2002).
- [8] D.A Lowther and P.P. Silvester, *Computer-Aided Design in Magnetics* (Springer-Verlag, New York, 1985), p. 218-222.
- [9] J. Liu, G.H. Shirkoohi and E.M. Freeman, IEEE Transactions on Magnetics **28**, 1072 (1992).
- [10] J.A. Stratton, *Electromagnetic Theory* (McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1941), p. 151-152.
- [11] Q. Chen, A. Konrad and P.P. Biringer, Appl. Computat. Electromagn. Soc. J. **9**, 37 (1994).
- [12] Q. Chen and A. Konrad, IEEE Transactions on Magnetics **33**, 663 (1997).
- [13] A.C. Bertuola e M.V. Figueredo, Rev. Bras. Ens. Fis. **26**, 161 (2004).
- [14] E.M. Freeman and D.A. Lowther, IEEE Transactions on Magnetics **24**, 2934 (1988).