

José Américo Dias Pinto (*/**)

Carlos F. Lemos Antunes (*)

A. Paulo Breda Coimbra (*)

(*) Lab. CAD/CAE, Dep. Engenharia Electrotécnica da Universidade de Coimbra

(**) Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

CADdyTERM 2D - Um Pacote de "Software" para Simulação e Análise Térmica em Regime Permanente e Transitório de Dispositivos Electromagnéticos

resumo

Este artigo descreve um pacote de programas de "software", o CADdyTERM 2D, desenvolvido para análise e simulação do aquecimento em dispositivos electromagnéticos. Usa o método dos elementos finitos para resolver o problema da condução térmica em domínio 2D, com transferência de calor por convecção e/ou radiação na fronteira. Finalmente é analisada a precisão dos resultados obtidos com o CADdyTERM 2D, comparando-os com as soluções obtidas por outros métodos.

CADdyTERM 2D - A Software Package for Thermal Simulation and Analysis of Steady State and Transient Phenomena in Electromagnetic Devices

summary

This paper describes CADdyTERM 2D, a software package for the analysis and simulation of the steady-state and transient heating phenomena in an electromagnetic device. It uses the finite element approach to solve the heat conduction problem in a 2D domain with convective and radiation boundary conditions. The accuracy is investigated, by comparing and discussing the solution produced with CADdyTERM 2D for two thermal examples with the results obtained with other methods.

1. Introdução

A crescente tendência de miniaturização e as múltiplas aplicações dos dispositivos electromagnéticos e dos sistemas electrónicos obrigam a indústria a dispor de potentes ferramentas de projecto, para poder responder à competitividade dos mercados interno e externo.

No caso particular da Engenharia Electrotécnica, os projectos dos dispositivos a fabricar requerem a simulação e a análise dos fenómenos electromagnéticos e de transferência de calor, e posteriormente o estudo do comportamento mecânico dos materiais.

Os fenómenos da transferência de calor, tais como os fenómenos electromagnéticos, são descritos por equações diferenciais às derivadas parciais ou por funcionais, obtidos

a partir de considerações energéticas. Para resolver estes problemas de tipo contínuo é recomendado o método dos elementos finitos [3].

O estudo do aquecimento tem um papel fundamental na fase de projecto, atendendo a que a sobrelevação de temperatura altera o valor das grandezas electromagnéticas e mecânicas, condicionando a capacidade e a utilização do dispositivos. Para dar resposta a todas as questões de transferência de calor em regime estacionário e transitório, em domínios heterogéneos a duas dimensões, foi desenvolvido um pacote de programas, o CADdyTERM 2D, de filosofia modular, constituído por um pré-processador, um processador e um pós-processador[1].

O pré-processador é um módulo de entrada, de filosofia

eminentemente gráfica e interactiva, que permite a criação e a edição do modelo numérico discreto, correspondente ao dispositivo físico a estudar.

O processamento é feito a partir dos modelos numéricos de elementos finitos estabelecidos para os regimes permanente e transitório.

O pós-processador é um módulo de filosofia numérica/gráfica e interactiva, que permite transformar os resultados obtidos na fase de processamento em solução de Engenharia, bem como a visualização gráfica dessas grandezas úteis ao projecto.

Esta filosofia de projecto garante uma grande flexibilidade no que respeita à imposição das exigências colocadas pelos futuros utilizadores dos dispositivos e contribui para uma diminuição drástica do tempo de concepção de um novo produto, nomeadamente evitando a construção de séries de protótipos.

A precisão dos resultados obtidos com o CADdyTERM 2D foi avaliada na solução de dois problemas de aplicação de que se conheciam antecipadamente as soluções, embora obtidas por outros métodos [9].

2. Programa Desenvolvido

O CADdyTERM 2D é um programa modular, sendo constituído por um pré-processador, formando pelos módulos TERMyPRE e TERMyEXE, por um processador, o TERMyPRO, e por um pós-processador, o TERMyPOS.

O módulo TERMyPRE é um pré-processador gráfico interactivo a duas dimensões que permite ao utilizador criar um modelo numérico discreto (malha de elementos finitos), que traduza a forma geométrica do dispositivo físico a estudar. Dispõe de um conjunto completo de comandos fáceis de usar e que permitem ao utilizador criar, inspeccionar e modificar uma estrutura de dados referentes a um dado modelo. O modelo criado contém, não só informação completa acerca das formas geométricas e dimensões do dispositivo, mas também sobre os materiais utilizados, as fontes térmicas existentes e as condições de fronteira tipo Dirichlet. Pode ainda incluir algum texto que caracterize o modelo, como por exemplo o nome, a data e o tipo de estudo a efectuar.

Durante a fase de construção da malha não é necessário definir explicitamente o tipo de material utilizado ou as fontes térmicas associadas com cada elemento finito, sendo apenas obrigatório etiquetar o elemento. Isto permite, a partir do modelo gerado pelo TERMyPRE, simular um grande número de situações de funcionamento do dispositivo, alterando apenas as propriedades dos materiais ou o valor da densidade de corrente.

O módulo TERMyEXE tem como objectivo fundamental caracterizar termicamente o modelo matemático gerado pelo TERMyPRE. Possui um conjunto de comandos que permitem visualizar o modelo e etiquetar os elementos finitos onde se faz sentir a transferência de calor por convecção e por radiação.

O ficheiro gerado pelo TERMyEXE pode ser utilizado e manipulado pelo processador TERMyPRO, a fim de serem obtidas as soluções do problema térmico em regime permanente ou um regime transitório.

Finalmente o TERMyPOS converte a solução matemática do problema térmico num resultado de Engenharia, permitindo visualizar os valores dos pontos quentes, traçar variações da temperatura ao longo de uma linha, mostrar as isotérmicas, traçar mapa de vectores de fluxo de calor e mostrar a sobrelevação da temperatura por níveis de cores [2].

3. Formulação

O problema da condução térmica em regime estacionário num domínio Ω a duas dimensões [4], é descrito pela seguinte equação diferencial às derivadas parciais:

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + f = 0 \quad (1)$$

sendo

∇ - operador gradiente
 k - condutividade térmica [W/(m.K)]
 T - temperatura [K]
 f - fontes de calor [W/m³]

Tratando-se de uma análise em regime transitório, a equação que descreve o fenómeno térmico é a seguinte:

$$m c T' - \nabla \cdot (k \nabla T) - f = 0 \quad (2)$$

com

T' - derivada da temperatura em ordem ao tempo [K/s]
 m - densidade específica [kg/m³]
 c - calor específico [J/kg.K]

Aplicando o método de Bubnov-Galerkin[5] à equação (1) obtém-se um sistema de equações algébricas que pode ser apresentado na seguinte notação matricial:

$$(\mathbf{S} + \mathbf{H} + \mathbf{R}) \mathbf{T} = \mathbf{F} + \mathbf{P} + \mathbf{E} \quad (3)$$

sendo

\mathbf{S} - matriz das condutividades térmicas
 \mathbf{H} - matriz referente à transferência térmica por convecção
 \mathbf{R} - matriz referente à transferência térmica por radiação
 \mathbf{T} - vector das temperaturas nodais
 \mathbf{F} - vector das fontes térmicas
 \mathbf{P} - vector referente à transferência térmica por convecção
 \mathbf{E} - vector referente à transferência térmica por radiação

Em simulações de regime transitório, e utilizando o mesmo método numérico [6], a solução será obtida a partir da seguinte equação diferencial ordinária:

$$\mathbf{M} \mathbf{T}' + (\mathbf{S} + \mathbf{H} + \mathbf{R}) \mathbf{T} = \mathbf{F} + \mathbf{P} + \mathbf{E} \quad (4)$$

sendo

T' - vector das derivadas das temperaturas nodais em ordem ao tempo

M - matriz das capacidades térmicas

Uma descrição mais detalhada sobre os coeficientes de cada uma das matrizes apresentadas pode ser encontrada em outros artigos apresentado pelos autores [7, 8].

4. Exemplos de Aplicação

Para se aferirem os modelos numéricos estabelecidos e se validarem as técnicas de simulação utilizadas pelo CADdyTERM 2D, foram resolvidos, com o pacote de programas desenvolvido, dois problemas de transferência de calor em domínios 2D. Os resultados produzidos pelo método dos elementos finitos foram analisados e comparados com as soluções obtidas pelo método numérico das diferenças finitas e com valores exactos ou experimentais.

4.1. Exemplo 1

Pretende-se estudar o problema da transferência de calor em regime estacionário e transitório num domínio 2D, com fontes de calor internas [9], encontrando-se as respectivas condições de fronteira devidamente especificadas (Fig. 1).

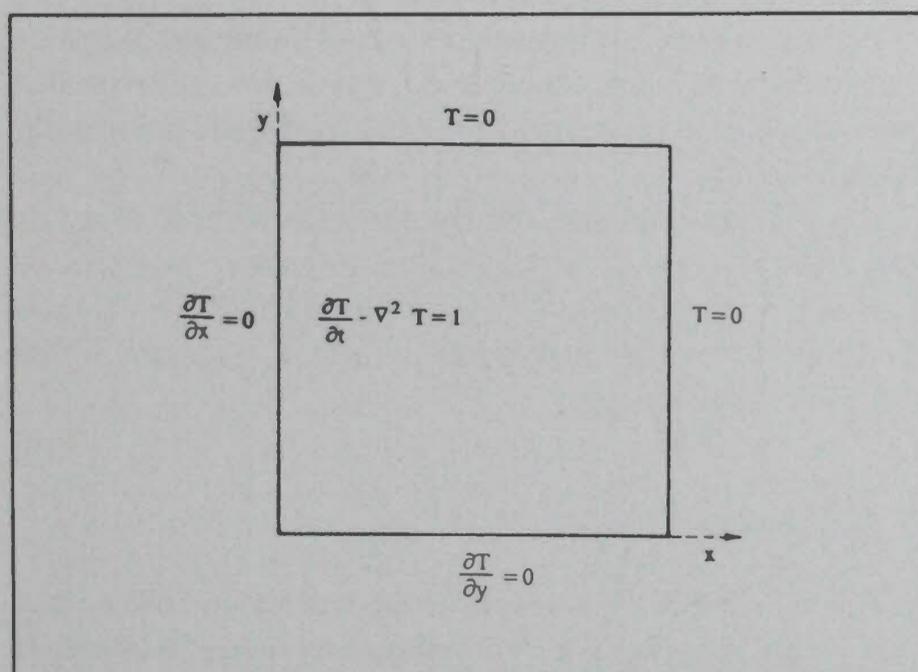


Fig. 1 - Domínio a analisar.

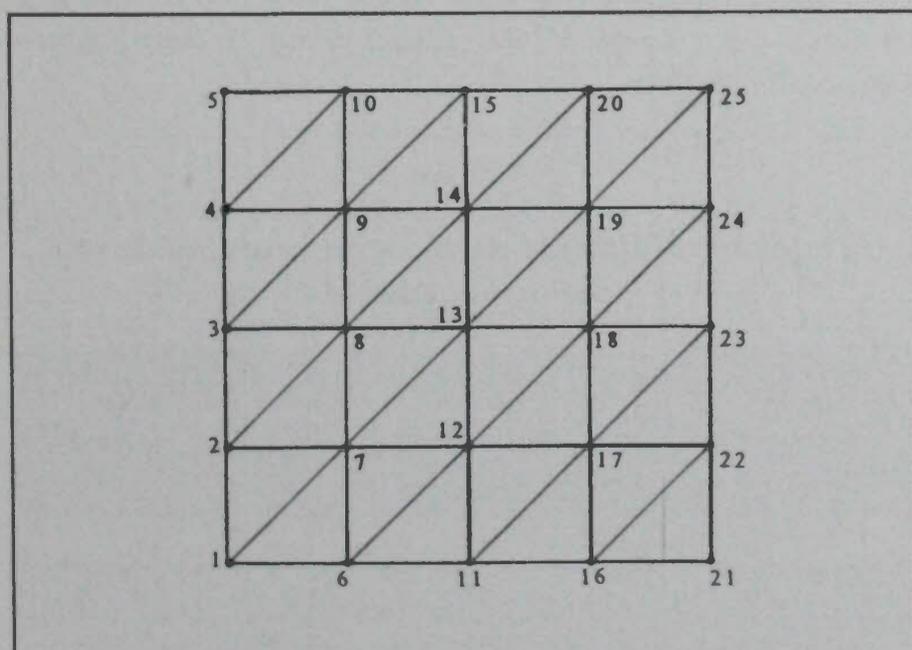


Fig. 2 - Malhas de elementos finitos.

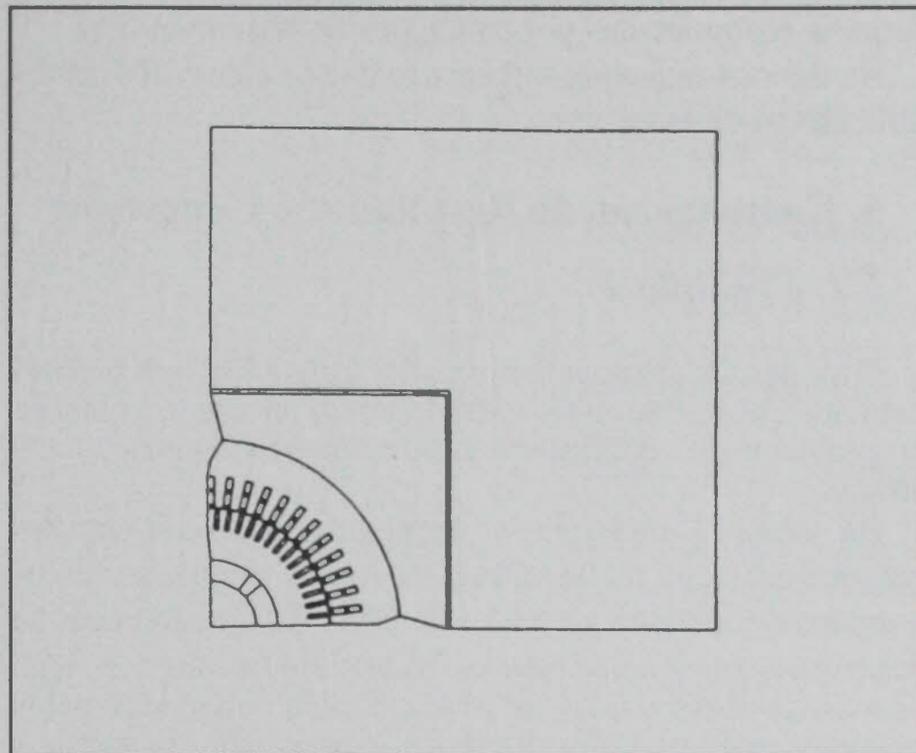


Fig. 3 - Modelo analisado.

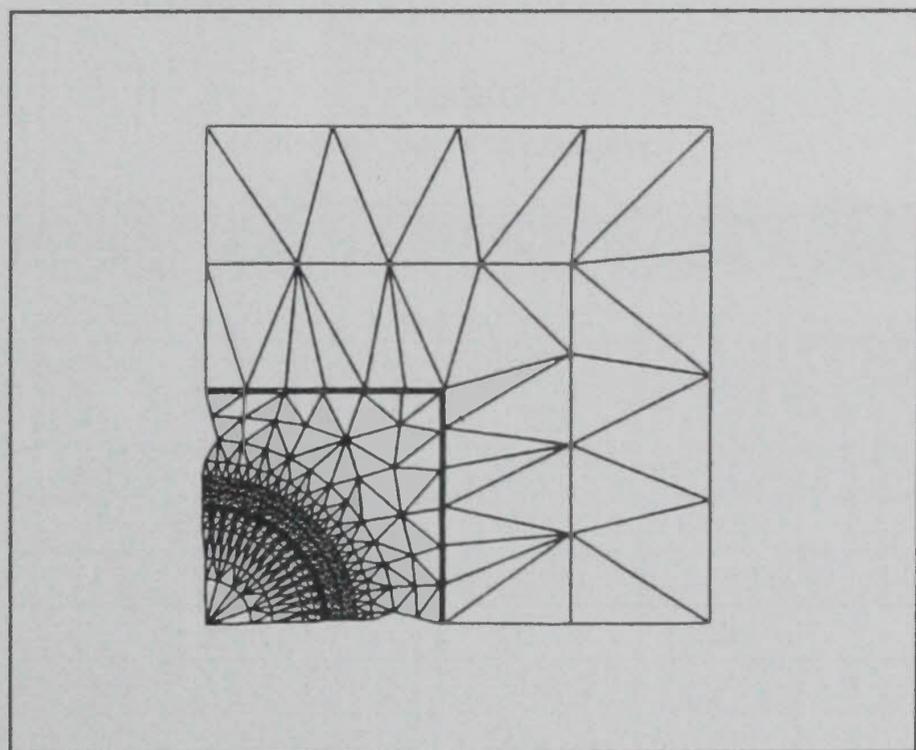


Fig. 4 - Malha de elementos finitos.

Neste estudo, foram assumidos valores unitários para as características do material do domínio (densidade específica, calor específico, condutividade térmica e resistividade eléctrica) e para a densidade de corrente eléctrica.

Para se poder aplicar o processador térmico desenvolvido, o domínio em análise foi discretizado em elementos finitos (Fig. 2), com o auxílio do pré-processador.

4.2 Exemplo 2

Foi estudado o problema da transferência de calor em regime estacionário num motor de indução trifásico (1,65 MW, 6 kV, 183,8 A) fabricado pela Sepsa para um ventilador de insuflação de uma central termoeléctrica. Na análise efectuada foi admitido um coeficiente de transferência de calor por convecção de 15 W/(m². K) na parede exterior da máquina e uma temperatura do ar ambiente igual a 288 K. No interior, foi considerada uma velocidade média de 14 m/s para o fluido de refrigeração, a várias temperaturas.

Atendendo à simetria só é analisada uma parte do modelo do motor de indução (1 passo polar), sendo as linhas de

simetria representadas por condições de Neumann (Fig. 3).

Na figura 4 está representada a malha de elementos finitos utilizada neste estudo.

5. Comparação de Resultados e Conclusões

5.1. Exemplo 1

O modelo de elementos finitos foi utilizado e manipulado pelo processador térmico, a fim de serem obtidas as soluções do problema do aquecimento nos regimes permanentes e transitório.

Na tabela 1 mostram-se os valores das temperaturas nalguns nodos da malha, produzidos pelo programa desenvolvido, e correspondentes à simulação da transferência de calor nos regimes estacionário e transitório (instante $t = 1,0$). São ainda apresentadas as temperaturas, calculadas pelos métodos analítico e das diferenças finitas para os mesmos pontos do domínio. Para se poder investigar a precisão dos valores obtidos pelos métodos numéricos, foram calculados os respectivos erros relativamente à solução exacta.

TABELA 1
Temperaturas no modelo

nodo	solução exacta	diferenças finitas	erro (%)	elementos finitos	erro (%)
1	0,2947	0,2911	1,2	0,3013	-2,2
2	0,2789	0,2755	1,2	0,2805	-0,57
3	0,2293	0,2266	1,2	0,2292	0,044
4	0,1397	0,1381	1,1	0,1392	0,36
5	0,0000	0,0000	0,0	0,0000	0,0
7	0,2642	0,2609	1,2	0,2645	-0,11
8	0,2178	0,2151	1,2	0,2172	0,28
9	0,1333	0,1317	1,2	0,1327	0,45
10	0,0000	0,0000	0,0	0,0000	0,0
13	0,1811	0,1787	1,3	0,1801	0,55
14	0,1127	0,1110	1,5	0,1117	0,89
15	0,0000	0,0000	0,0	0,0000	0,0
18	0,0728	0,0711	2,3	0,0715	1,8
20	0,0000	0,0000	0,0	0,0000	0,0
25	0,0000	0,0000	0,0	0,0000	0,0

Na figura 5 está representada a evolução transitória da temperatura ao longo de uma linha do modelo, para diferentes instantes de tempo.

O estudo acabado de realizar permite comparar a precisão da solução do problema de aquecimento em regime permanente obtida pelo método das diferenças finitas e a produzida pelo método dos elementos finitos com o CADdyTERM 2D (Tabela 1).

Nos nodos da malha onde não foi especificado o valor da temperatura, a utilização do método das diferenças finitas produziu um desvio mínimo de 0,0016, a que corresponde um erro percentual de 1,1%. Os resultados obtidos com o método dos elementos finitos aproximam-se da solução exacta,

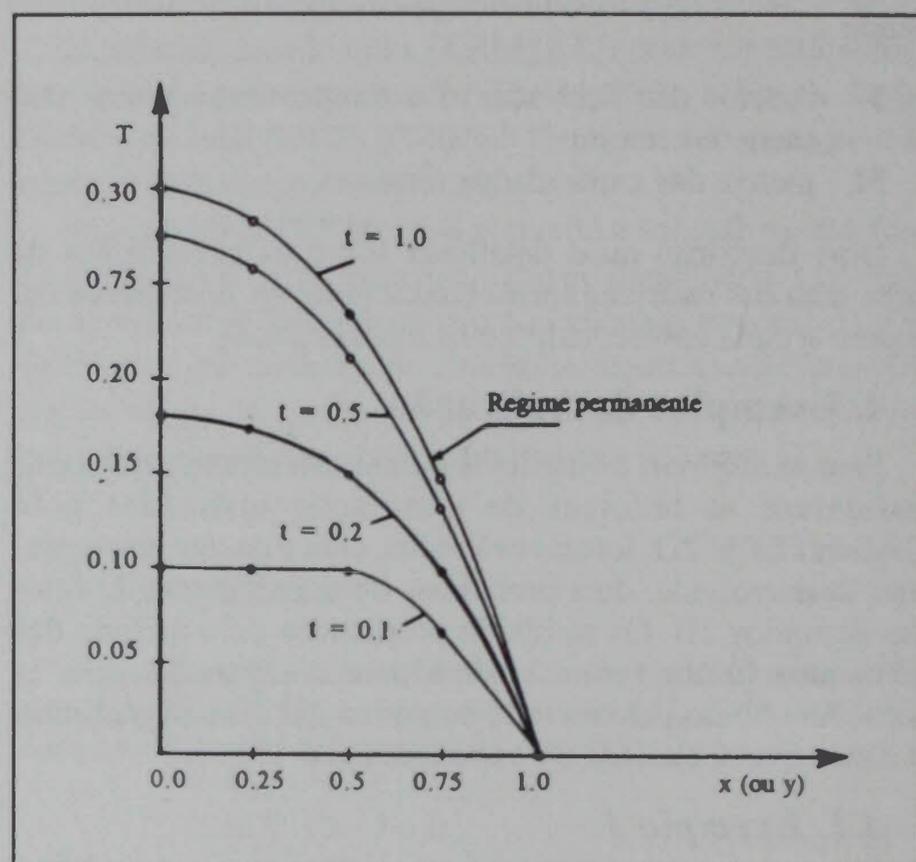


Fig. 5 - Temperatura ao longo de uma linha.

apresentando apenas um desvio mínimo de 0,0001, a que corresponde um erro relativo de 0,044%.

Pode-se concluir que, na resolução de um problema de transferência de calor, o método dos elementos finitos produz uma solução mais precisa do que a calculada pelo método das diferenças finitas.

A partir da análise da variação da temperatura ao longo de uma linha do modelo, calculada em diferentes instantes de tempo (Fig. 5), poder-se concluir que a solução transitória do campo térmico converge para o mesmo resultado obtido na análise estacionária.

5.2. Exemplo 2

A Tabela 2 apresenta os valores das temperaturas máximas para várias situações e a figura mostra as linhas isotérmicas do motor de indução, correspondentes ao regime de carga nominal, sem perdas no ferro.

Foram conseguidos resultados com uma margem de erro inferior a 2%, em relação aos valores experimentais fornecidos pelo fabricante.

TABELA 2

Temperatura máxima para várias situações de um motor de indução

Temperatura do fluido [K]	Temperatura máxima [K]	
	sem perdas no ferro	com perdas no ferro
306	355	365
296	345	355
286	335	345
276	325	335

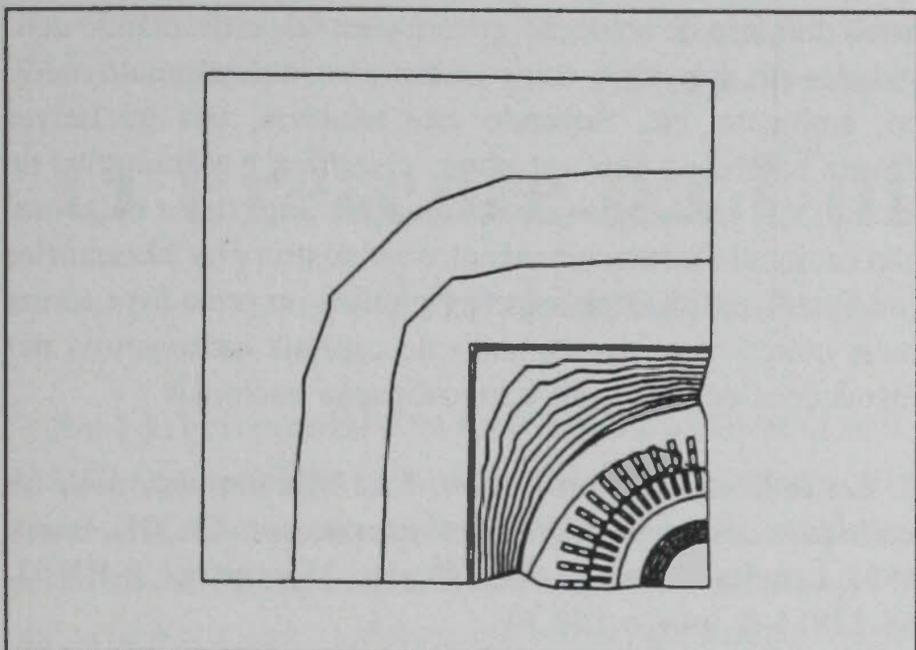


Fig. 6 - Linhas isotérmicas.

REFERÊNCIAS

[1] C. F. R. L. Antunes, A. P. B. Coimbra, *MAGCAD - A Finite Element Package for the Analysis of Electrostatic Field Problems*, 9th International Symposium on Computer Aided Design and Computer Aided Manufacturing, Zagreb, Yugoslavia, Oct. 1987.

[2] *CADdyTERM 2D - Manual do Utilizador*, Enaco Lda.,

1993.

[3] M. V. K. Chari, P. P. Silvester, *Finite Elements in Electrical and Magnetic Field Problems*, New York, John Wiley, 1980.

[4] R. W. Lewis, K. Morgan, O. C. Zienkiewicz, *Numerical Methods in Heat Transfer*, New York, John Wiley, 1981.

[5] J. A. D. Pinto, A. P. B. Coimbra, C. F. L. Antunes, *Heat Transfer Analysis and simulation in Cross-linked Polyethylene Power Cables*, AMSE Periodical Modelling Simulation & Control A, vol. 25 (1), 1989, pp. 55-62.

[6] J. A. D. Pinto, A. P. B. Coimbra, C. F. L. Antunes, *Análise Térmica em Regime Transitório de um Motor de Indução*, Actas das Primeiras Jornadas Hispano-Lusas de Engenharia Electrica, Vigo, vol. 1, 4-6 Jul. 1990, pp. 399-407.

[7] J. A. D. Pinto, C. F. L. Antunes, A. P. B. Coimbra, *Análise do Efeito Térmico das Correntes Induzidas em Regime Estacionário de um Motor de Indução em Carga*, Actas das Segundas Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrónica, Coimbra, Vol. 2, 3-5 Jul. 1991, pp. 152-158.

[8] J. A. D. Pinto, C. F. L. Antunes, A. P. B. Coimbra, *Cooling Analysis and Simulation in an Electromagnetic Device Using CAD/CAE Techniques*, Proceedings of the ACEMP'92 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, Kusadasi, Turkey, Vol. 1, 27-29 May 1992, pp. 231-234.

[9] J. N. Reddy, *An Introduction to the Finite Element Method*, McGraw-Hill, 1985.

Congresso de Automação em Portugal

Em Maio realizaram-se em Lisboa as 2.^{as} Jornadas de Projecto, Planeamento e Produção Assistidos por Computador. Trata-se de um dos principais eventos nacionais na área dos Sistemas Integrados de Manufatura (CIM-Computer Integrated Manufacturing). São, de facto, muito significativos os crescentes esforços de I & D neste sector, nomeadamente a nível da Comunidade Europeia, Estados Unidos, Japão e outros polos de desenvolvimento do Pacífico.

Quando nos encontramos em pleno processo de integração europeia da nossa Ciência e Tecnologia, a presente conferência, enquanto esforço de divulgação, troca de experiências e apresentação de resultados, constitui um importante instrumento de apoio à comunidade de engenheiros ligados ao sector produtivo, além de constituir também uma montra do estado de internacionalizações da nossa C & T, já que um elevado número de comunicações resulta de outros tantos projectos europeus com participação portuguesa em domínios como: CAD/CAM monitorização e controlo de qualidade, sistemas sensoriais, sistemas de apoio à decisão, CIM, robótica móvel, integração de sistemas, robótica - manipuladores, visualização gráfica e simulação, autómatos e controladores, planeamento e gestão de produção, sistemas antropocêntricos de produção.

A par das comunicações nestas áreas, as Jornadas



incluíram ainda quatro conferências convidadas, visando temas técnicos de importante actualidade: STEP: uma norma internacional para a modelação de toda a informação técnica relativa a produtos; Gestão da produção e sistemas CIM; Ambiente e indústria; Sistemas antropocêntricos de produção.

Relativamente às Jornadas anteriores deram-se vários passos no sentido do aumento da qualidade das comunicações. Assim, a selecção passou a ser feita com

base em resumos alargados (3 a 4 páginas). Cada comunicação foi avaliada por 5 membros da Comissão de Programa, que inclui uma boa representação de especialistas dos vários ramos, de reconhecida competência a nível académico e industrial, e com razoável distribuição geográfica. Como condições de aceitação exigiu-se uma clara maioria de votos. A classificação média das comunicações seleccionadas foi de 4 (escala 1 a 5).

Continuam, todavia, a verificar-se algumas "lacunas" nomeadamente em termos de comunicações oriundas do meio empresarial. Persiste uma certa "timidez" na divulgação de resultados, mesmo quando se verifica o desenvolvimento de projectos de reconhecida qualidade. Julgamos que, para colmatar esta lacuna, se torna necessário um esforço de toda a comunidade de engenheiros do sector produtivo.

No entanto pode-se dizer que este ano as Jornadas foram um êxito, que promete grandes progressos para o futuro.