Simulação e Análise Térmica por Elementos Finitos de um Transformador Seco Trifásico*

José Américo Dias Pinto[a,b]
António Paulo Breda Coimbra[b]
Carlos F. R. Lemos Antunes[b]
[a]**Lab. CAD/CAE, Dep. de Engenharia Electrotécnica**
Universiade de Coimbra, 3000 Coimbra - PORTUGAL
[b]**Instituto Superior de Engenharia de Coimbra**
3030 Coimbra - PORTUGAL

Abstract

In order to minimise maintenance costs in electric power systems it is important to investigate and propose new technical solutions. This is the case for the transformer technology where oil-immersed transformers are being replaced by dry ones.

In this paper it is presented the analysis and simulation of the heating dissipation of a three-phase dry transformer with different loading conditions.

The thermal distribution was obtained using CADdyTERM, a software package developed by the authors to perform the steady-state and transient heat transfer analyis and simulation of an electromagnetic device.

The numerical results produced by this package, which uses the finite element method as the differential approach, were compared with measured experimental values showing a very close agreement.

1. Introdução

O aquecimento exagerado de um transformador conduz inevitavelmente a um envelhecimento precoce do dispositivo [1]. Este fenómeno resulta da oxidação lenta do isolante, que vai progressivamente perdendo a resistência mecânica e diminuindo a rigidez dieléctrica. A experiência mostra que a vida média de um transformador reduz-se aproximadamente a metade, no caso de funcionamento em regime de sobrecarga permanente que resulte numa sobrelevação térmica do 10° C [2].

Para poder escolher convenientemente a classe de isolamento e o sistema de refrigeração mais adequados, evitando a redução drástica de vida média do transformador por aquecimento excessivo, o projectista necessita de conhecer as características térmicas do dispositivo, nomeadamente a temperatura máxima atingida para cada regime de carga. Embora se possa recorrer aos ensaios laboratoriais de protótipos, a utilização de técnicas de CAD/CAE permite simular, mais facilmente e com menores custos, todas as condições de serviço, assim como realizar testes não destrutivos [4, 5].

Neste artigo é simulado em 2D o fenómeno de condução térmica em regime permanente com convecção. Este estudo é aplicado a um transformador seco trifásico para obtenção da distribuição térmica e respectivos pontos quentes, em função dos diversos níveis de carga, para uma determinada temperatura ambiente.

2. Modelização Térmica em Regime Permanente

O problema da condução térmica, em regime permanente, num domínio D, é definido pela seguinte equação de Poisson [3]

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + f_t = 0 \qquad (1)$$

sendo

∇ - operador diferencial
k - condutividade térmica [W/(m K)]
T - temperatura [k]
f_t - fontes térmicas [W/m^3]

A transferência de calor por radiação foi desprezada e a condutividade térmica dos vários materiais foi considerada constante, não variando com a temperatura [3].

Para se estabelecer o modelo numérico de elementos finitos, o domínio 2D foi discretizado e aplicada as condições de estacionaridade ao funcional correspondente à eq. (1) [6].

(*) Apresentado nas 4.as Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, realizadas no Porto.

Para um elemento típico obteve-se a seguinte equação matricial.

$$(\boldsymbol{S}^e + \boldsymbol{H}^e)\, \boldsymbol{T}^e = \boldsymbol{F}^e + \boldsymbol{P}^e \qquad (2)$$

sendo

$\boldsymbol{S}^e$ - matriz das condutividades térmicas
$\boldsymbol{H}^e$ - matriz de convecção
$\boldsymbol{T}^e$ - vector das temperaturas nodais
$\boldsymbol{F}^e$ - vector das fontes de calor
$\boldsymbol{P}^e$ - vector de convecção

Estas matrizes são dadas por

$$S_{ij}^e = \frac{k}{4\Delta}(b_i\, b_j + c_i\, c_j) \qquad (3)$$

sendo

$$\boldsymbol{H}^e = \frac{h_{ij}\, l_{ij}}{6}\begin{bmatrix}2&1&0\\1&2&0\\0&0&0\end{bmatrix} + \frac{h_{jk}\, l_{jk}}{6}\begin{bmatrix}0&0&0\\0&2&1\\0&1&2\end{bmatrix} + \frac{h_{ki}\, l_{ki}}{6}\begin{bmatrix}2&0&1\\0&0&0\\1&0&2\end{bmatrix} \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{F}^e = f_t \frac{\Delta}{3}\begin{bmatrix}1\\1\\1\end{bmatrix} \qquad (5)$$

$$\boldsymbol{P}^e = \frac{h_{ij}\, l_{ij}\, T_f}{2}\begin{bmatrix}1\\1\\0\end{bmatrix} + \frac{h_{jk}\, l_{jk}\, T_f}{2}\begin{bmatrix}0\\1\\1\end{bmatrix} + \frac{h_{ki}\, l_{ki}\, T_f}{2}\begin{bmatrix}1\\0\\1\end{bmatrix} \qquad (6)$$

$$b_i = y_j - y_k \qquad (7)$$

$$c_i = x_k - x_j \qquad (8)$$

$$f_t = \rho\, J^2 \qquad (9)$$

sendo

Δ - área do elemento finito [m^2]
h_{ij} - coeficiente de convecção na aresa *ij* do elemento finito [W/m^{2}K]
l_{ij} - comprimento da aresta *ij* do elemento finito [m]
T_f - temperatura [K]
x_i - abcissa do nodo *i* do elemento finito
y_i - ordenada do nodo *i* do elemento finito
ρ - resistividade eléctrica do cobre [Ω.m]
J - densidade de corrente eléctrica [A/m^2]

Somando as contribuições, dadas por (2), dos elementos finitos da malha, obtém-se o seguinte sistema de equações algébricas lineares

$$\boldsymbol{A}\ \boldsymbol{T} = \boldsymbol{B} \qquad (10)$$

As temperaturas nodais, solução do problema térmico, são obtidas resolvendo a equação matricial anterior, depois de terem sido impostas condições de fronteira do tipo Dirichlet.

3. Exemplo de Aplicação

Foi estudado o problema da condução térmica com regime permanente num transformador trifásico de 150 VA, 220/24 V, com os enrolamentos do primário ligados em triângulo e os do secundário em estrela. Foi tido em conta o efeito da transferência de calor por convecção entre o dispositivo e o meio ambiente.

As únicas fontes de calor consideradas neste estudo foram as produzidas por efeito Joule devido às correntes nos enrolamentos do transformador. As perdas no ferro foram omitidas porque, em termos de projecto, o seu efeito é compensado pela transferências de calor nas faces anterior e posterior do dispositivo [6]. Só com uma modelização a três dimensões seria possível considerar o efeito do arrefecimento em todas as faces do transformador.

Foram analisadas várias situações de carga equilibrada, com uma temperatura do ar ambiente de 293 K. Atribui-se um coeficiente de transferência de calor por convecção de 10 W/(m^{2}K), correspondente à convecção natural [7, 8].

Na medição experimental das temperaturas, no exterior do transformador, foi utilizado um termómetro de resistência de platina (PT100).

Mostra-se, na figura 1, o modelo analisado e, na figura 2, a malha de elementos finitos utilizada neste estudo. Esta malha corresponde apenas a um quarto do modelo, devido às simetrias do dispositivo, modelizadas como fronteiras Neumann homogéneas.

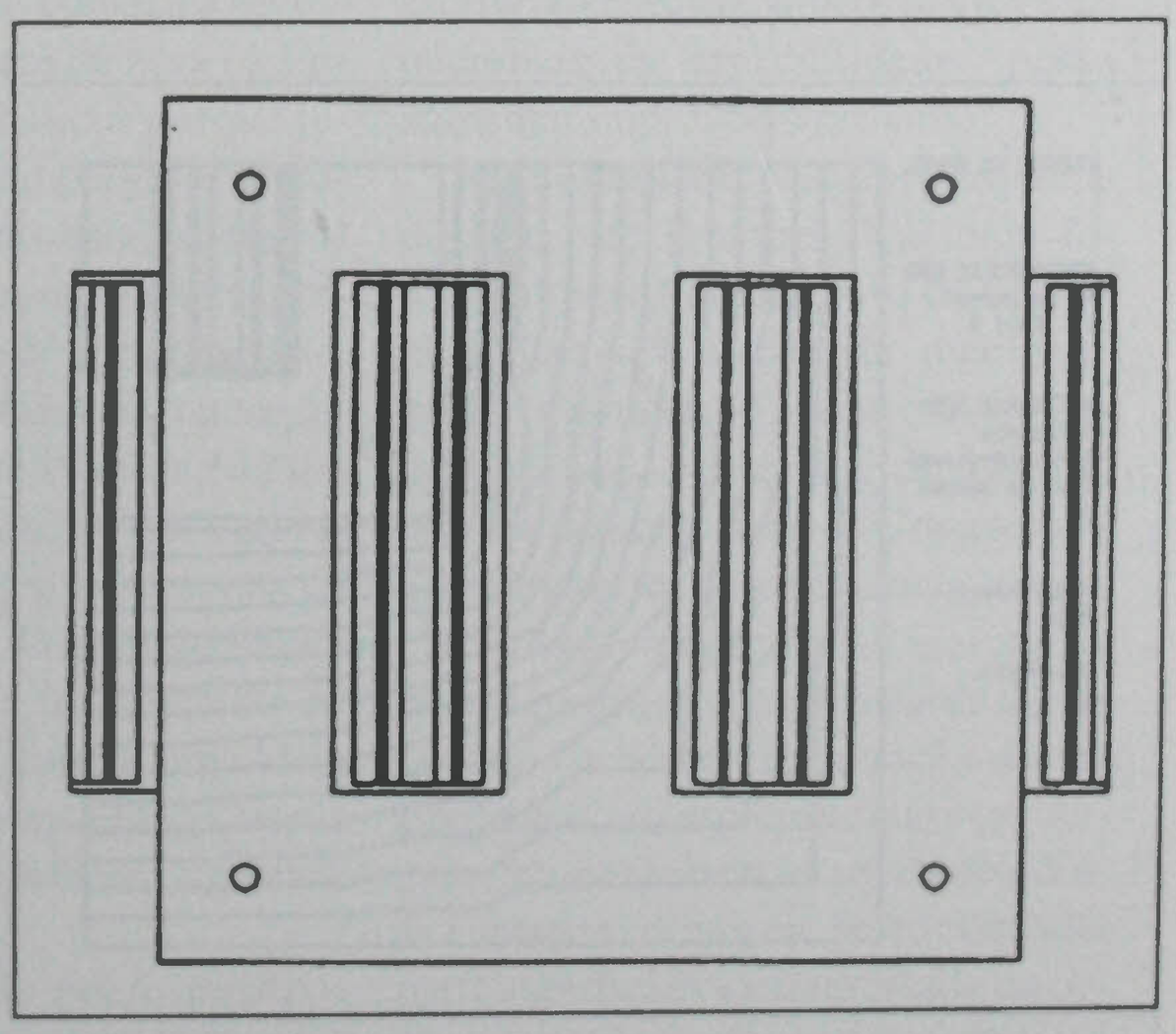

Fig. 1 - Modelo analisado.

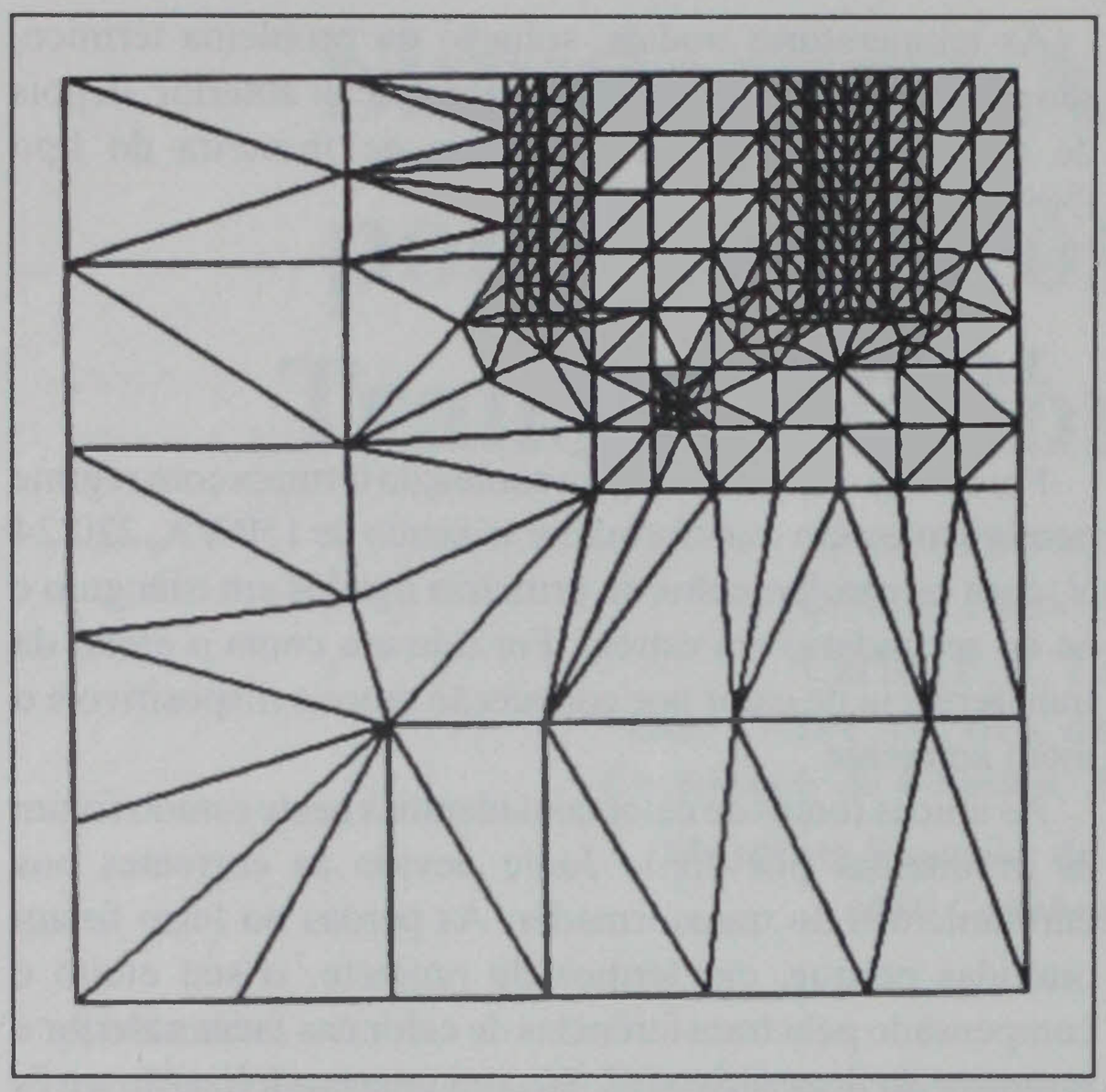

Fig. 2 - Malha utilizada.

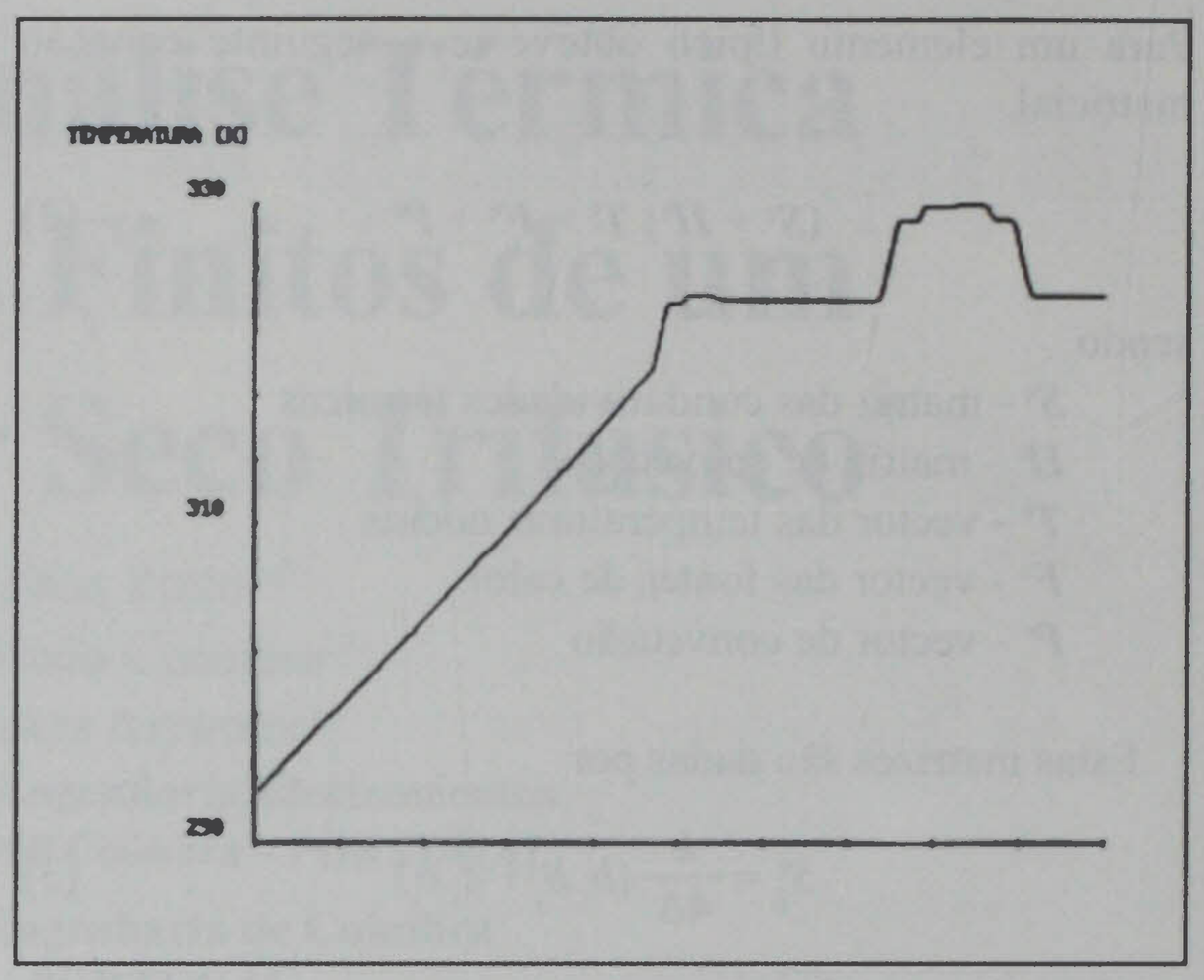

Fig. 4 - Variação da temperatura ao longo da linha média do transformador.

4. Resultados Obtidos

Na figura 3 estão representadas as linhas isotérmicas do transformador, correspondentes a uma situação de carga nominal.

Na figura 4 mostra-se a variação da temperatura ao longo da linha média do transformador. Os mais quentes do dispositivo são, como se pode observar, nos enrolamentos da coluna central, que são os menos ventilados.

Na tabela seguinte apresenta-se, para várias situações de carga, os valores da temperatura no papel que envolve exteriormente os enrolamentos, na coluna central da chapa magnética e no ponto quente do transformador.

TABELA 1
Temperaturas para diferentes regimes de carga.

Temperaturas \ Carga	70%	80%	90%	100%	120%	140%
T medido papel [K]	305.8	309.3	311.8	312.8	–	–
T cad papel [K] (erro)	306.1 (0.1%)	310.1 (0.3%)	314.6 (0.9%)	319.7 (2.2%)	331.4 (–)	345.3 (–)
T medido ferro [K]	313.5	316.7	321.4	324.5	–	–
T cad ferro [K] (erro)	308.1 (-1.7%)	312.7 (-1.3%)	318.0 (-1.1%)	323.8 (-0.2%)	337.4 (–)	353.5 (–)
T cad max [K]	311.1	316.7	323.0	330.0	346.3	365.6

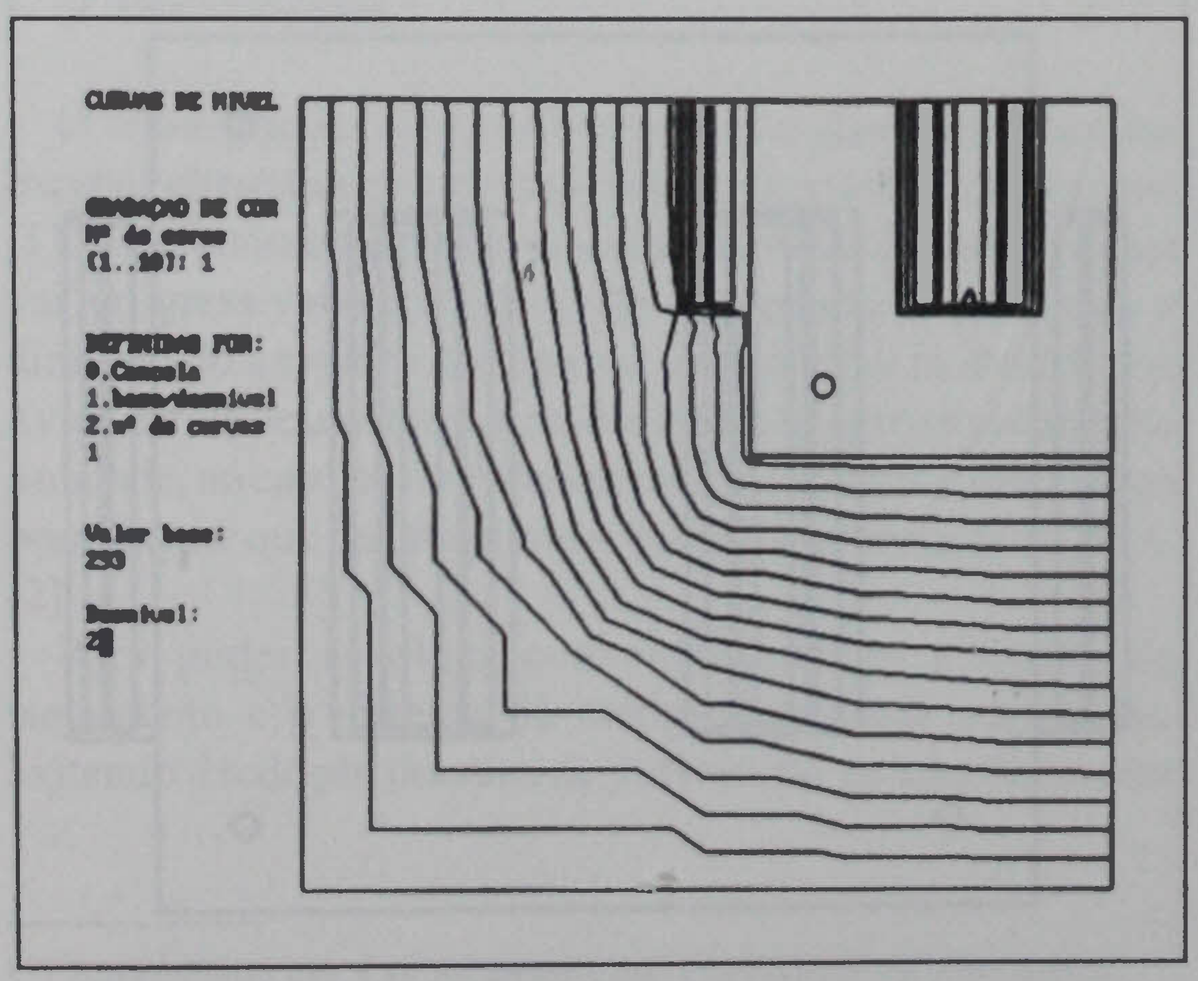

Fig. 3 - Linhas isotérmicas.

5. Conclusões

Dos resultados obtidos podem ser retiradas as seguintes conclusões:

- atendendo à geometria do dispositivo analisado, em que a profundidade não é preponderante face às outras duas dimensões, uma análise tridimensional poderia permitir uma simulação mais precisa do fenómeno de transferência de calor. No entanto, o grau de precisão obtido com a análise 2D parece não justificar o esforço adicional necessário à tarefa de modelização e análise da solução do modelo a 3D;
- a precisão dos resultados obtidos comprova o interesse destas novas técnicas de simulação e análise assistidas por computador, no projecto e optimização de dispositivos electromagnéticos.