

600

888.08  
A 688  
10/MEIN

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**“CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO CONTROLE DE TEMPERATURA  
EM COMPONENTES ELETRÔNICOS”**

**DIRBI - UFU** MON. 02038/96



1000175219

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por **Newton Félix de Araújo Filho**, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, tendo como banca examinadora:

- 
- |  |         |
|--|---------|
| Prof. Dr. Orosimbo A. A. Rego (Orientador) | -UFU    |
| Prof. Dr. Gilmar Guimarães.                | - UFU   |
| Prof. Dr. Lutero Carmo de Lima.            | - UFU   |
| Prof. Dr. Edson Luís Zapparoli             | ITA-CTA |

Uberlândia, 09 de setembro de 1996

*Nesta do mundo a mais mimosa parte,  
Em cujo soberano, e fértil pólo  
Vos reconhece o mundo novo Marte,  
Onde vos representa novo Apolo:  
Inculcando o valor, engenho, e arte  
Inveja dos murmúrios de Pactolo,  
Mostrates nesta ação, que tudo alcança  
Cam. Em uma mão a pena, e noutra a lança.*

**Gregório de Matos (1633-1696)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
DIRETORIA DO SISTEMA DE BIBLIOTECAS

Procedência: \_\_\_\_\_

Valor: R\$ dois mil e 380

Recebido em: 1.10.96

O.P.D. \_\_\_\_\_

N.F./Folha: \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Registro 02038/96 Data 21.10.96

Volume: \_\_\_\_\_ Exemplar: 1

FU-00006991-8

Ao meu filho,  
**Gabriel Alves Araújo**  
pela minha ausência,  
DEDICO.

## Meus Sinceros Agradecimentos

- Ao Prof. Dr. Orosimbo Andrade de Almeida Rego, pela orientação científica, ensinamentos, disponibilidade e confiança depositada durante a execução deste trabalho.
- Aos Professores Lutero Carmo de Lima, Milton Biage e Ricardo Fortes de Miranda, pela colaboração didática.
- Aos colegas Arlindo, Marcelo, Marcos, Mechelangelo, pela amizade e colaboração.
- A minha esposa Maria de Lourdes Alves Fonseca, pela paciência, apoio, compreensão, amizade e amor .
- A todos meus familiares.
- A Cintia e Melo, pelos recursos computacionais.
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela ajuda financeira concedida.

# CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DO CONTROLE DE TEMPERATURA EM COMPONENTES ELETRÔNICOS

## SUMÁRIO

	Página
Resumo.....	IV
Abstract.....	V
Lista de figuras.....	VI
Lista de tabelas.....	XI
Lista de símbolos.....	XII
1 - INTRODUÇÃO	
1.1 - Levantamento do Problema.....	1
1.2 - Histórico.....	4
1.3 - Objetivo.....	15
2 - FORMULAÇÃO	
2.1 - Considerações quanto a geometria.....	16
2.2 - Equação fundamental.....	18
2.3 - Condições de contorno e iniciais.....	19
2.4 - Calores globais e taxas envolvidas.....	21
2.5 - Potência gerada pelo circuito.....	23
2.6 - Adimensionalização das equações.....	26

3 - SOLUÇÃO NUMÉRICA	
3.1 - Discretização das equações	29
4 - PROCEDIMENTO DE CÁLCULO	
4.1 - Introdução.....	39
4.2 - Fluxograma computacional.....	43
4.3 - Programa computacional.....	47
5 - RESULTADOS E ANÁLISE	
5.1 - Introdução.....	48
5.2 - Regime contínuo de geração interna de calor, com duas placas paralelas de circuitos.....	52
5.3 - Validação do modelo.....	58
5.4 - Regime intermitente de geração interna de calor, com duas placas paralelas de circuitos.....	61
5.5 - Regime senoidal de geração interna de calor, com duas placas paralelas de circuitos.....	67
5.6 - Regime contínuo de geração interna de calor com três placas paralelas de circuitos.....	73
6 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	
6.1 - Introdução.....	79

6.2 - Influência do número de Biot (Ensaio 1).....	83
6.3 - Influência da intensidade de geração interna de calor (Ensaio 2).....	88
6.4 - Influência da temperatura do fluido de arrefecimento (Ensaio 3).....	90
6.5 - Influência da espessura do material isolante (Ensaio 4).....	93
6.6 - Influência da condutividade térmica do material isolante (Ensaio 5).....	95
7 - CONCLUSÃO.....	97
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

ARAÚJO FILHO, N. F.; Contribuição ao Controle de Temperatura em Componentes Eletrônicos; Uberlândia, CETEC-UFU, 1996, 102p.

Resumo: Desenvolveu-se um modelo numérico para simular o comportamento de um componente eletrônico, caracterizado por uma configuração geométrica simplificada, composta por placas paralelas de circuitos onde ocorre geração interna de calor, envolvidas por material dielétrico e submetidos a uma condição de resfriamento por convecção . O modelo foi desenvolvido a partir da técnica dos volumes finitos, para discretizar a equação da energia em regime não permanente, bidimensional e com a presença de um termo de geração interna, não uniforme no domínio e podendo variar com o tempo em diferentes regimes de operação. De posse do modelo validado, fez-se um análise numérica da influência de parâmetros geométricos e construtivos do componente e de transferência de calor do fluido de resfriamento no controle de temperaturas em regiões críticas do sistema.

*COMPONENTE ELETRÔNICO. REFRIGERAÇÃO. CONTROLE DE TEMPERATURA.*

ARAÚJO FILHO, N. F.; Contribution to Temperature Control in Electronic Components; Uberlândia, CETEC-UFU, 1996, 102p.

Abstract: A numerical model was developed to simulate the behavior of an electronic device. This device is characterized by a simplified geometric configuration with parallel plates of electronic circuits, where an internal heat generation occurs. The plates are separated by a dielectric material, and cooled by convection. The model was developed using the finite control volume technique in order to solve the energy equation, in unsteady state and bidimensional regime. The equation takes into account a non uniform heat generation on the domain and different regimes of operation. In the model, a numerical analysis was done in order to verify the influence of geometrical and design parameters of the electronic components and also thermal parameters of the cooling fluid in the temperature control of critical regions on such devices.

*ELECTRONIC COMPONENTS. REFRIGERATION. CONTROL OF TEMPERATURE.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
INTRODUÇÃO		
1.1	- Tendência de dissipação de potência nas CPUs dos micro computadores com o decorrer dos anos [2].....	2
1.2	- Tendência do nível do fluxo de calor nos módulos IBM [15].....	6
1.3	- Secção transversal de um típico módulo de chip simples, sobre a placa de circuito impresso com os caminhos térmicos [15].....	7
1.4	- Módulo multichip Hitachi resfriado a ar [13].....	10
1.5	- Módulo multichip IBM 4381, resfriado através da injeção de um jato de ar[3].....	11
1.6	- Módulo multichip Fujitsu FACOM M-780, refrigerado a água com foles [17].....	12
FORMULAÇÃO		
2.1	- Geometria do componente eletrônico.....	17
2.2	- Esquema das condições de contorno.....	19
2.3	- Fluxo de calor constante.....	23
2.4	- Fluxo de calor intermitente.....	24
2.5	- Fluxo de calor senoidal.....	24

## SOLUÇÃO NUMÉRICA

3.1	- Esquema de discretização com a nomenclatura empregada...	29
3.2	- Esquema da malha utilizada, indicando a numeração e domínio dos diferentes tipos de volumes de controle.....	30

## PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

4.1	- Linha na qual aplica-se o método TDMA [11].....	40
4.2	- Estrutura da matriz tridiagonal.....	42
4.3	- Fluxograma geral do programa computacional.....	43
4.4a	- Fluxograma da função que monta as linhas da matriz temperatura (continuação).....	44
4.4b	- Fluxograma da função que monta as linhas da matriz temperatura (continuação).....	45
4.4c	- Fluxograma da função que monta as linhas da matriz temperatura (continuação).....	46

## RESULTADOS

5.1	- Nomenclatura utiliza para configuração geométrica com duas placas paralelas de circuitos.....	49
5.2	- Nomenclatura utiliza para configuração geométrica com três placas paralelas de circuitos.....	50
5.3	- Curvas dos calores envolvidos, para o regime contínuo.....	52
5.4	- Taxas globais envolvidas, para o regime contínuo.....	53

5.5	- Calor armazenado no isolante e no circuito, para o regime contínuo.....	54
5.6	- Variação da temperatura no ponto crítico, para o regime contínuo.....	55
5.7	- Perfis de temperatura na superfície convectiva, para o regime contínuo.....	57
5.8	- Perfis de temperatura na linha crítica, para o regime contínuo.....	58
5.9	- Erro percentual no transiente.....	59
5.10	- Curvas dos calores envolvidos, para o regime intermitente.....	61
5.11	- Taxas globais envolvidas, para o regime intermitente.....	62
5.12	- Calor armazenado no isolante e no circuito, para o regime intermitente.....	63
5.13	- Variação da temperatura no ponto crítico, para o regime intermitente.....	64
5.14	- Perfis de temperatura na superfície convectiva, para o regime intermitente.....	65
5.15	- Perfis de temperatura na linha crítica, para o regime intermitente.....	66
5.16	- Curvas dos calores envolvidos, para o regime senoidal.....	67
5.17	- Taxas globais envolvidas, para o regime senoidal.....	68
5.18	- Calor armazenado no isolante e no circuito, para o regime senoidal.....	69

5.19 - Variação da temperatura no ponto crítico, para o regime senoidal.....	70
5.20 - Perfis de temperatura na superfície convectiva, para o regime senoidal.....	71
5.21 - Perfis de temperatura na linha crítica, para o regime senoidal.....	72
5.22 - Curvas dos calores envolvidos, para o regime contínuo com três circuitos.....	73
5.23 - Taxas globais envolvidas, para o regime contínuo com três circuitos.....	74
5.24 - Calor armazenado no isolante e no circuito, para o regime contínuo com três circuitos.....	75
5.25 - Variação da temperatura no ponto crítico, para o regime contínuo com três circuitos.....	76
5.26 - Perfis de temperatura na superfície convectiva, para o regime contínuo com três circuitos.....	77
5.27 - Perfis de temperatura na linha crítica, para o regime contínuo com três circuitos.....	78

## INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.

6.1 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes números de Biot.....	83
---	----

6.2a - Perfis de temperatura na superfície convectiva para diferentes números de Biot.....	84
6.2b - Perfis de temperatura na superfície convectiva para diferentes números de Biot.....	85
6.3 - Perfis de temperatura na linha crítica para diferentes números de Biot.....	86
6.4 - Calores armazenados no isolante e no circuito para diferentes números de Biot.....	87
6.5 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes intensidades de geração interna de calor.....	88
6.6 - Calores armazenados no isolante e no circuito para diferentes intensidades de geração interna de calor.....	89
6.7 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes temperaturas de resfriamento.....	90
6.8 - Calores armazenados no isolante e no circuito para diferentes temperaturas do fluido de resfriamento.....	92
6.9 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes espessuras de isolante.....	93
6.10 - Calores armazenados no isolante e no circuito para diferentes espessuras de isolante.....	94
6.11 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes condutividades térmicas.....	95
6.12 - Calores armazenados no isolante e no circuito para materiais de condutividades térmicas diferentes.....	96

## LISTAS DE TABELAS

<b>Tabela</b>		<b>Página</b>
5.1	- Configuração e dimensões geométricas.....	48
5.2	- Condições iniciais de simulação.....	49
6.1	- Propriedades termo-físicas utilizadas nos ensaios.....	80
6.2	- Parâmetros geométricos das malhas.....	80
6.3a	- Ensaios realizados para verificar a influência dos parâmetros de transferência de calor e geométricos.....	81
6.3b	- Ensaios realizados para verificar a influência dos parâmetros de transferência de calor e geométricos.....	82

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos

A, B, C, D, E	Dimensões da malha, definida na figura 5.1 e 5.2, paginas 49 e 50.
E, W, P, N, S	Pontos, definidos na figura 3.1, pagina 29;
e, w, n, s	Pontos que identificam a interface dos volumes finitos, definidos na figura 3.1, pagina 29;
$Bi$	Número de Biot, $Bi = \frac{h_c H}{k_i}$ ;
$C_p$	Calor específico, $\left( \frac{J}{Kg.K} \right)$ ;
$DI$	Diagonal inferior;
$DP$	Diagonal principal;
$DS$	Diagonal Superior;
$F$	Termo fonte adimensional, $F = \frac{q''' H^2}{k_i T_r}$ ;
$F_0$	Número de Fourier, $F_0 = \frac{t}{t_0}$ ;
$h_c$	Coeficiente convectivo, $\left( \frac{W}{m^2.K} \right)$ ;
$H$	Metade da altura do componente eletrônico, (m);
$i$	Componente na direção x;
$j$	Componente na direção y;
$k$	Condutividade térmica, $\left( \frac{W}{m.K} \right)$ ;
$L$	Metade da largura do componente eletrônico, (m);
$q'''$	Geração interna de calor, $\left( \frac{W}{m^3} \right)$ ;

$\dot{q}_a$	Taxa de calor armazenada, (W);
$\dot{q}_c$	Taxa de calor perdida por convecção, (W);
$\dot{q}_g$	Taxa de calor gerado, (W);
$Q_{at}$	Calor armazenado no isolante, (J);
$Q_{ac}$	Calor armazenado no circuito, (J);
$Q_{aT}$	Calor armazenado total, (J);
$Q_c$	Calor perdido por convecção, (J);
$Q_g$	Calor gerado, (J);
$S_p$	Termo fonte discretizado, $S_p = F\Delta x\Delta y$ ;
$t$	Tempo dimensional, (s);
$t_0$	Tempo característico, $t_0 = \frac{H^2 \rho_i C_{pi}}{k_i}$ ;
$T$	Temperatura, (K);
$T_f$	Temperatura do fluido de resfriamento, (K);
$T_i$	Temperatura inicial, (K);
$T_p$	Temperatura na parede convectiva, (K);
$T_r$	Temperatura de referência, (K);
$u$	Componente de velocidade na direção x;
$v$	Componente de velocidade na direção y;
$V$	Volume, ( $m^3$ );
$x$	Coordenada cartesiana, abcissa;
$X$	Coordenada cartesiana adimensional, abcissa;
$y$	Coordenada cartesiana, ordenada;
$Y$	Coordenada cartesiana adimensional, ordenada;

[A]	Matriz dos coeficientes;
[B]	Vetor definido pela equação 4.2;
[ $\theta$ ]	Vetor temperatura adimensional;
$\delta$	Distância entre pontos cardeais, definido na figura 3.1, pagina 29.
$\Delta$	Dimensão do volume finito, definido na figura 3.1, pagina 29.
$\Delta t$	Diferença de tempo;
$\Delta t_{off}$	Intervalo de tempo que o componente fica desligado, (s);
$\Delta t_{on}$	Intervalo de tempo que o componente fica ligado, (s);
$\rho$	Densidade, $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ ;
$\theta$	Temperatura adimensional, $\theta = \frac{T - T_r}{T_r}$ ;
$\theta_i$	Temperatura inicial adimensional, $\theta = \frac{T - T_r}{T_r}$ ;

### Subscritos:

I	Isolante;
C	Circuito;
IC	Interface isolante/circuito;

### Sobrescrito:

—	Adimensional;
0	Instante atual;
1	Instante anterior;

# **1- INTRODUÇÃO**

## **1.1 - LEVANTAMENTO DO PROBLEMA**

O desenvolvimento da micro informática vem buscando aumentar as velocidades de processamento e da capacidade de armazenamento dos sistemas o que tem levado a um processo crescente de miniaturização dos circuitos eletrônicos. Esse processo no entanto vem acompanhado de uma taxa maior de calor gerado nos componentes, e para que se garanta o seu bom funcionamento torna-se imperativo dissipar essa energia para que os circuitos não sejam submetidos a temperaturas demasiadamente elevadas.

A figura 1.1, ilustra o processo de crescimento da energia dissipada nos microcomputadores com o desenvolvimento desses equipamentos ao longo dos anos.

Para manter-se em melhores condições térmicas, circuitos eletrônicos ou pacotes eletrônicos, deve-se estabelecer um caminho de transferência de calor mais eficiente para o agente refrigerante externo. O caminho é subdividido em interno e externo ao componente.

O caminho interno corresponde a transferência de calor por condução através de diferentes materiais e das interfaces que os separam até a superfícies que envolvem os dispositivos eletrônicos. O externo corresponde a transferência de calor por convecção natural, forçada ou mista

a partir da superfície aquecida para o fluido de arrefecimento.

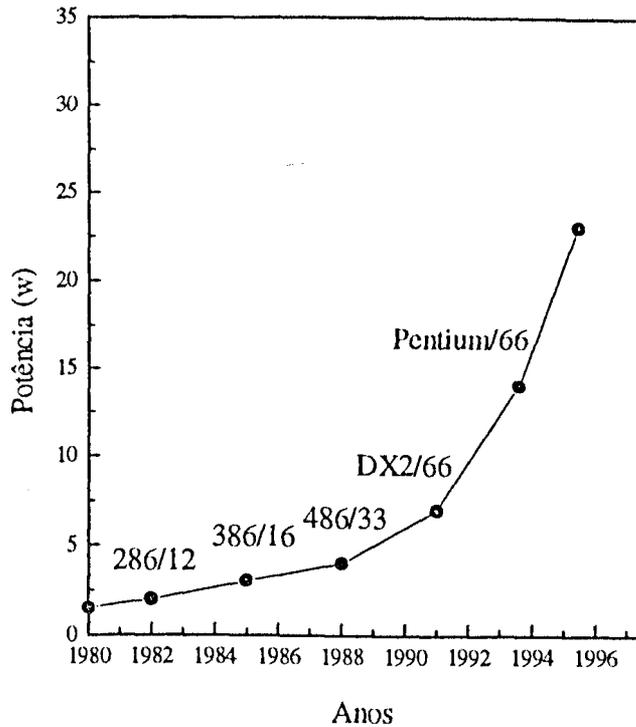


Figura 1.1 - Tendência de dissipação de potência nas CPUs dos micros computadores com o decorrer dos anos[2].

Procedimentos de refrigeração tal como circulação forçada por ar se tornaram insuficientes para garantir essa dissipação de calor e outros processos para controle térmico de componentes eletrônicos, tem sido pesquisados, tal como o emprego de líquidos, como agente de refrigeração de CPUs, já existentes em algumas instalações.

Estudos objetivando o controle de temperatura em dispositivos eletrônicos, utilizando materiais de mudança de fase tem sido objeto de

interesse de vários pesquisadores, dentre eles Alves e Rego (1986) e Ferreira e Rego (1993). O controle é baseado no aproveitamento do calor latente desses materiais durante o processo de fusão, para promover a dissipação do calor gerado no dispositivo eletrônico, mantendo sua operação em níveis de temperaturas desejados. Douglas e Rego (1995) desenvolveram um modelo matemático, que simula o comportamento entre o material de mudança de fase e o componente eletrônico de maneira acoplada, utilizando uma geometria plana simétrica e semi-infinita, levando em consideração a geração interna de calor no componente, e a circulação do material de mudança de fase, devido a ação dos efeitos de convecção natural na fase líquida e também as perdas por convecção para um agente externo de refrigeração.

A utilização de fluídos frigoríficos em evaporação como agente de refrigeração é uma solução bastante promissora em virtude dos níveis de temperatura que se pode conseguir para esses fluídos, e também pelo fato de que com a vaporização, grandes quantidades de calor estão envolvidas.

## 1.2 - HISTÓRICO

Deste o desenvolvimento dos primeiros computadores digitais eletrônicos, a remoção de calor tem representado um importante papel para manter a operação dos mesmos mais confiáveis. Hannemann e Bar-Cohen (1986), relatam em seu trabalho que a dissipação de uma potência da ordem de  $10\text{ W}$ , através da superfície de  $5 \times 5\text{ mm}$  de um chip, produz um fluxo da ordem de  $4 \times 10^5\text{ W/m}^2$ . Isto é 20 vezes menor do que o fluxo dissipado pelo sol, cuja temperatura na superfície é superior a  $6000^\circ\text{C}$ , enquanto que os chips produzidos em 1986, apresentam temperatura de operação de aproximadamente  $100^\circ\text{C}$ .

Teoricamente, se um chip trabalhar com este fluxo de calor poderá de alguma maneira exceder a temperatura de  $6000^\circ\text{C}$ , submetido apenas a convecção natural e desprezando os efeitos da radiação [3]. Em convecção forçada o chip poderá ser resfriado a temperatura de  $1000^\circ\text{C}$ , através de gases comuns e para aproximadamente  $50^\circ\text{C}$  utilizando líquidos comuns.

Se, por outro lado, o calor for conduzido para fora por meio de um bastão de cobre prensado contra o chip, a temperatura no chip poderá ser reduzida para aproximadamente  $30^\circ\text{C}$ , assumindo-se que o bastão de cobre seja mantido a  $25^\circ\text{C}$  através de resfriamento externo e que o contato interfacial entre o bastão e o chip sejam perfeitos. Caso haja uma pequena fresta, por exemplo de  $1\text{ mm}$  na interface, a temperatura poderá atingir  $600^\circ\text{C}$ . Imergindo o chip em um refrigerante em evaporação, a

temperatura pode ser abaixada para aproximadamente  $45^{\circ}\text{C}$ , utilizando-se hidrofluorcarboneto como refrigerante. Para o futuro, Hannemann e Bar-Cohen (1986), esperam que apareçam novas técnicas para o tratamento dos mecanismos de transferência de calor e que hajam mais trabalhos utilizando fluídos refrigerantes em condensação e fluídos criogênicos para promover a transferência de calor, já que a temperatura de operação dos dispositivos deverem ficar próximas de  $0^{\circ}\text{C}$ .

Em relação ao tratamento da resistência térmica e de contato, espera-se que as mesmas sejam amenizadas através de novas tecnologias que empreguem novos materiais, além do desenvolvimento do processo de prensagem do micro-chip.

Salienta-se ainda a importância de métodos de análise e de simulação numérica, para avaliar os novos projetos, bem como a necessidade de novas técnicas experimentais especializada, na medição de velocidades muito baixas de escoamentos, medição direta do coeficiente de transferência de calor e técnicas ópticas/infravermelho para medição de temperatura e fluxo de calor nos semicondutores.

Ulrich e Rajan (1995), desenvolveram um trabalho experimental e uma modelagem numérica utilizando elementos finitos, na qual era investigado e determinado os limites térmicos atingidos utilizando-se interconecções supercondutivas entre os chips do módulo multichip Sandia's ATC-03, resfriado por nitrogênio líquido. Obtiveram experimentalmente a curva de evaporação do nitrogênio, que retirava entorno de  $23 \text{ W/cm}^2$ . Essa curva era introduzida no modelo numérico que utilizava chips com superfície

superior de  $1 \text{ cm}^2$  sobre um substrato de MgO.

Simons (1995), faz uma revisão na evolução da tecnologia de resfriamento de alta eficiência que tem sido desenvolvida e utilizada em computadores IBM de médio e grande porte, entre os anos de 1960 e 1990, (Figura 1.2).

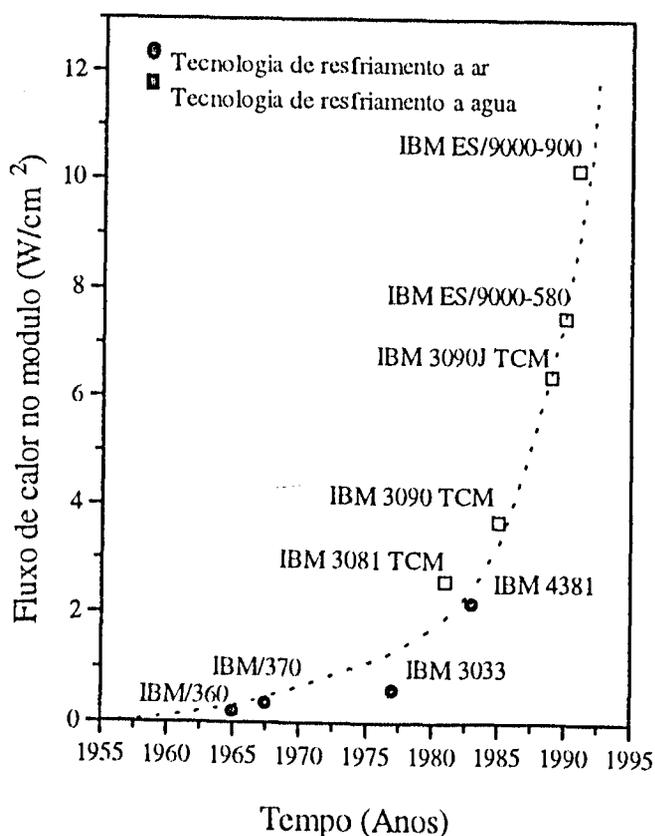


Figura 1.2 - Tendência do nível do fluxo de calor nos módulos IBM [15].

Durante os anos 60 os computadores IBM eram construídos usando pacotes com módulo de chip simples (SCM) com geometria e

caminhos térmicos similares aos mostrados na figura 1.3. O calor gerado pelo chip era conduzido para o substrato cerâmico através do ponto de solda e do substrato para a capa metálica ou então para a placa de circuito impresso. O calor era removido da superfície da capa metálica por convecção forçada utilizando o ar como fluido de resfriamento.

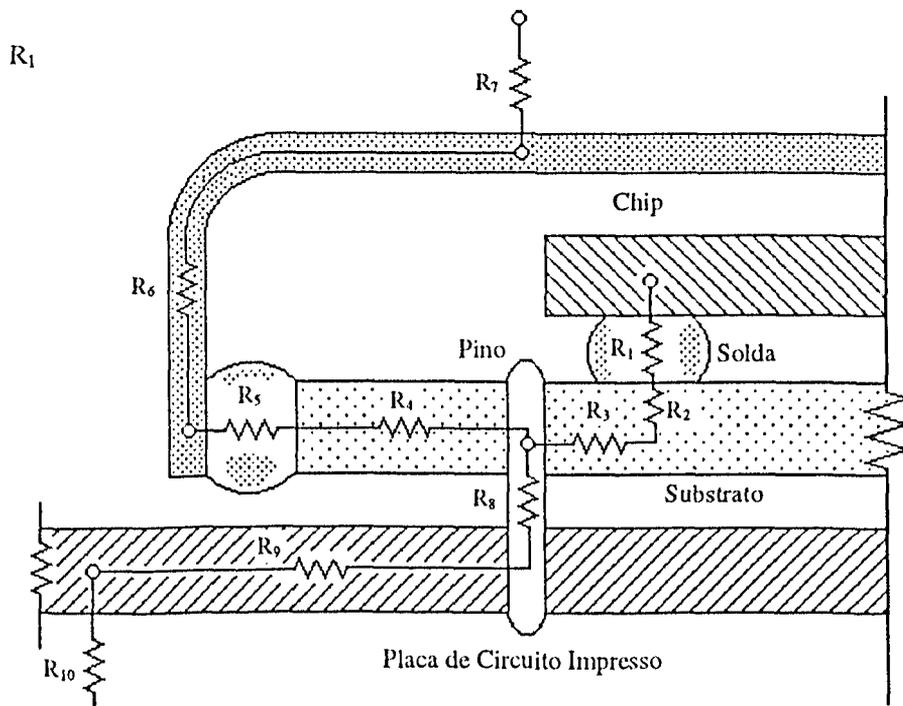


Figura 1.3 - Seção transversal de um típico módulo de chip simples sobre a placa de circuito impresso com os caminhos térmicos [15].

Na década de 70, com o surgimento dos módulos multichip (MCM), estudos indicaram que o tamanho físico adequado do substrato permitia apenas a montagem de 4 a 9 chips. Com o aumento do tamanho do

substrato e da quantidade de chips, a resistência térmica entre chip/substrato, devido aos pontos de soldas e a difusão térmica transversal ao substrato não poderia ser mais tolerada. Tornou-se necessário o desenvolvimento de outros meios para remoção de calor diretamente do dorso dos chips.

As técnicas de resfriamento de pacotes de chips incluem, a imersão direta do chip em líquido, o resfriamento por condução através de pistão colocado no dorso de cada chip e pelo preenchimento dos espaços vazios entre o chip e o invólucro por pasta térmica.

Em 1964, todos computadores IBM eram refrigerados por um sistema de resfriamento a ar no qual o mesmo era forçado através de canais formados entre os módulos. Estes módulos eram fixados sobre as placas de circuitos impressos. A partir de 1980 os módulos eram refrigerados utilizando água, como ilustra a figura 1.2.

Um importante passo na tentativa de aliviar o problema de remoção de calor, foi o desenvolvimento de *circuito monolítico em um chip de silício* e o desenvolvimento dos *circuitos integrados de grandes escalas* [9]. A partir das tecnologias integradas de grandes escalas, LSI em 1970, e VLSI de 1980, têm-se observado um crescente aumento da dissipação do calor a níveis de chip, módulos e sistemas. Esse aumento foi devido aos estudos de transferência de calor e principalmente aos novos projetos térmicos. O desenvolvimento futuro de circuitos de grandes escalas e altas velocidades podem ser limitados justamente pela incapacidade de manter um

resfriamento efetivo.

Incropera (1988), avalia os chips que são montados em quantidade de moderada a elevada sobre um substrato cerâmico. Estes módulos de chips são cobertos na parte superior por uma proteção na qual aletas podem ser fixadas no intuito de aumentar a transferência de calor para o fluido refrigerante. Visto que a interface do material de cobertura influencia na transferência de calor, estes materiais podem ser interfaciados mecanicamente através de parafusos ou molas, bem como fixados por um agente aglutinante do tipo epoxy ou ainda por solda de baixa temperatura. Um requisito essencial da interface é que a mesma seja caracterizada por baixa tensão e resistência térmica.

Para ilustrar, dois módulos multichip resfriados a ar para os quais tem sido dada atenção na redução das resistências internas e externas são mostrados nas figuras 1.4 e 1.5.

No módulo SiC da Hitachi, figura 1.4 (Okutani e outros, 1984), o calor é transferido do chip para a placa de circuito impresso através dos pontos de soldas e daí para o substrato cerâmico. O substrato cerâmico é unido a placa de circuito impresso por uma ligação eutética de ouro e as aletas longitudinais de alumínio por uma fina camada de borracha de silicone. Para promover uma baixa resistência térmica interna, os coeficientes de expansão da placa de circuito impresso e do substrato cerâmico são aproximadamente iguais.

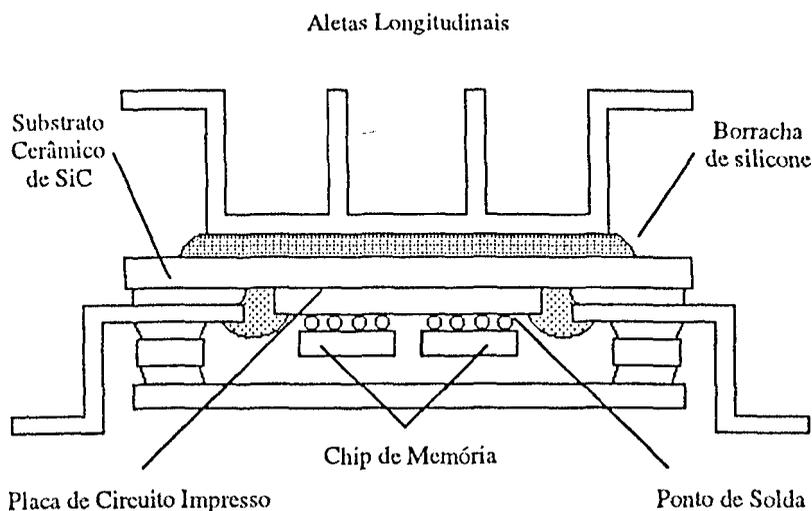


Figura 1.4 - Módulo multichip Hitachi resfriado a ar [13].

No módulo IBM 4381 figura 1.5 (Biskeborn, 1984), os chips são fixados ao substrato através de solda e são unidos a capa cerâmica através de uma camada de pasta térmica. A maior parte do calor dissipado pelo chip é transferido diretamente para a capa cerâmica através da pasta térmica ou indiretamente para o substrato através dos pontos de soldas. Injetando-se um jato de ar através das cavidades ocas do arranjo de aletas em alumínio fixadas sobre a capa cerâmica, retira-se o calor dissipado pelos chips.

Embora sejam compatíveis, as resistências térmicas internas associadas com os módulos da Hitachi e da IBM, o módulo IBM é caracterizado por uma resistência externa muito menor.

A redução da resistência térmica aumenta a importância da aplicação de tecnologias que envolvem refrigerante líquido. Uma distinção deve ser feita entre resfriamento líquido direto e indireto. No resfriamento

líquido direto existe contato físico entre o refrigerante e o componente eletrônico e no resfriamento indireto ou conduzido, os componentes estão fisicamente separados do líquido.

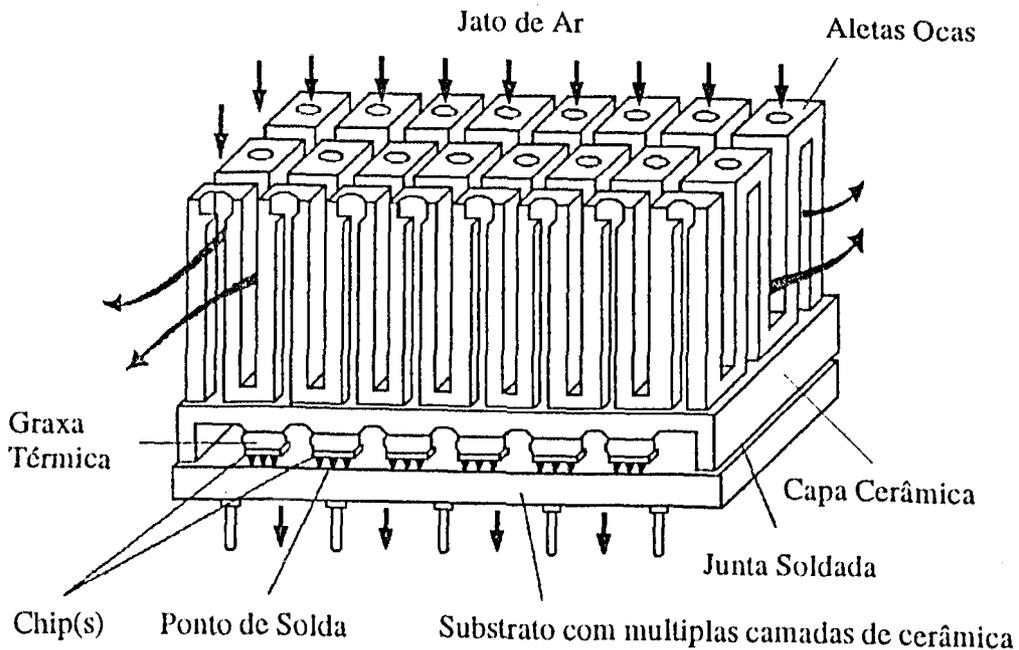


Figura 1.5 - Módulo multichip IBM 4381, resfriado através da injeção de um jato de ar [3].

A refrigeração líquida indireta foi realizada utilizando água gelada no resfriamento de pacote eletrônico. Um exemplo bem conhecido desta tecnologia é o módulo condutivo térmico (TCM) usado na serie de computadores IBM 308X/3090 (Chu e outros, 1982). Neste sistema, ainda permanece uma substancial resistência interna para a transferência de calor entre o chip e a placa fria. Para reduzir esta resistência, o fluido refrigerante deve ser injetado bem próximo aos componentes eletrônicos. Uma

aproximação (Yamamoto e outros, 1987) envolvendo a montagem dos chips de ambos os lados da placa de circuito impresso e interfaciando de cada lado com uma placa fria é mostrada na figura 1.6.

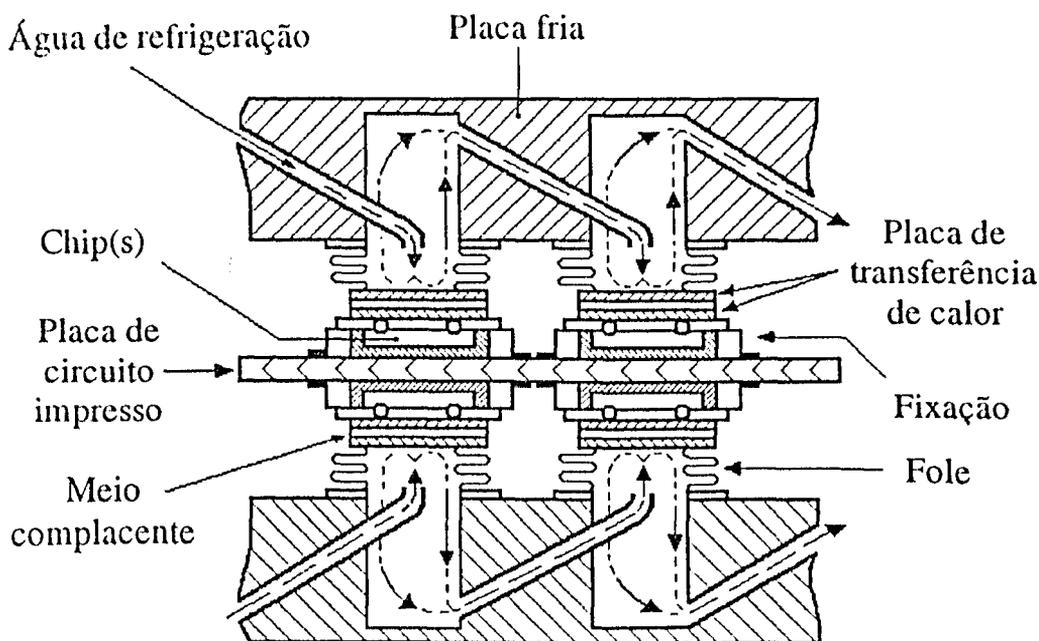


Figura 1.6 - Módulo multichip Fujitsu FACOM M-780, refrigerado a água com foles [17].

A interface é provida de fole que em seu interior é mantido um escoamento de água, permitindo assim elevados coeficientes de transferência de calor convectivo. Alternativamente, a resistência na interface entre a placa fria e o módulo multichip pode ser eliminada fazendo a placa fria como parte integral do módulo. Tais aproximações tem sido utilizadas por Kishimoto e Osaki (1986).

Os agentes refrigerantes líquidos que mantêm fisicamente contato direto com os componentes eletrônicos, devem ter uma grande resistência dielétrica e boa compatibilidade química com os componentes. Tipicamente, os refrigerantes são caracterizados por baixo ponto de vaporização e seu uso poderá envolver formação de bolhas ou evaporação em convecção forçada, bem como em convecção monofásica (natural, forçada, ou mista).

Embora a opção do resfriamento líquido direto tenha sido considerada bem superior durante vários anos, atualmente tem sido limitada a sistemas computacionais simples (Danielson e outros, 1986). Em módulos fixos de chips de memória e lógica imersos em líquido e a transferência de calor em condições de convecção mista é semelhante a ocorrida em convecção monofásica.

A revisão aqui feita das tecnologias de resfriamento eletrônico envolvem importantes tópicos em transferência de calor. Estes tópicos envolvem fenômenos de transferência de calor por condução, ocorridos na interface dos pacotes eletrônicos e transferência de calor por convecção nas superfícies externas dos pacotes. A convecção natural, forçada e mista devem ser associadas com refrigerantes tais como: ar, água, e líquidos dielétricos, embora a evaporação também possa ser associada ao uso de refrigerantes líquidos.

Observar-se que nos chips sempre há uma geração de calor e que está sempre acompanhada de uma resistência térmica, que dificulta a dissipação deste calor. Para o desenvolvimento da micro informática

tornou-se fator fundamental a dissipação dessa energia gerada para que possa manter os componentes eletrônicos em temperaturas operação satisfatórias.

### 1.3 - OBJETIVO

Levando em consideração o que foi mencionado anteriormente e principalmente as perspectivas para o futuro apresentada por de Hannemenn e Bar-Cohem (1986), este trabalho tem os seguintes objetivos:

a) Tratar numericamente a equação da energia em regime não permanente, através de técnicas dos volumes de controle finitos, incluindo uma geração interna  $q''' = (x, y, t)$  não uniforme em todo o domínio de estudo, já que a mesma só ocorre na região dos circuitos e variando com o tempo;

b) Estabelecer um procedimento para incluir no modelo numérico, uma forma consistente de tratar a variação abrupta da condutividade térmica dos materiais na interface entre os mesmos;

c) De posse de um modelo validado e que inclua as situações previamente citadas, verificar a influência para uma configuração bastante simplificada, dos seguintes parâmetros geométricos e de transferência de calor que determinam o comportamento térmico de um dispositivo eletrônico, com geração interna de calor e resfriado por convecção, a saber:

- Intensidade da geração interna;
- Coeficiente de convecção para o fluido de resfriamento;
- Temperatura do fluido de resfriamento;
- Espessura do material isolante;
- Condutividade térmica do material isolante.

## **2 - FORMULAÇÃO**

Neste tópico são apresentados a geometria do problema em estudo, a nomenclatura empregada e a equação fundamental que rege a transferência de calor no interior do componente eletrônico, bem como as condições de contorno e inicial utilizadas.

### **2.1 - CONSIDERAÇÕES QUANTO A GEOMETRIA**

A figura 2.1 ilustra a geometria do componente eletrônico simplificado, a ser modelado numericamente. O componente é constituído basicamente por duas regiões, uma delas correspondendo ao material que envolve os circuitos eletrônicos, que possui propriedades necessariamente dielétricas e que a partir de agora será referenciada como isolante e a outra região correspondente ao circuito eletrônico propriamente dito, a qual possui propriedades características dos condutores, sendo portanto a responsável pela geração de calor e será referenciado como circuito. O circuito pode ainda subdividir-se em duas ou mais regiões de geração de calor, as quais são envolvidas pela região dielétrica.

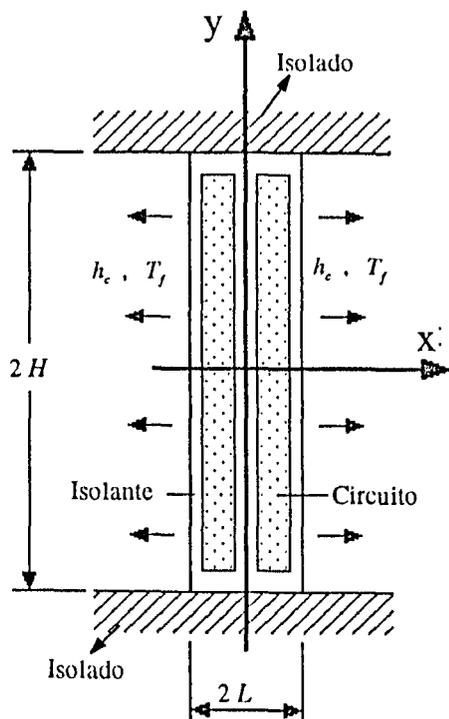


Figura. 2.1 - Geometria do componente eletrônico.

O sistema é submetido a uma condição de refrigeração por convecção, desprezando-se a transferência de calor na direção perpendicular ao plano da figura 2.1.

## 2.2 - EQUAÇÃO FUNDAMENTAL

A equação fundamental em regime não permanente da conservação da energia bidimensional em coordenadas cartesianas com termo de geração interna, que rege a transferência de calor no interior do componente, é dada por:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 \left( k \frac{T}{\rho C_p} \right)_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \left( k \frac{T}{\rho C_p} \right)_i}{\partial y^2} \quad (2.1)$$

onde, a temperatura  $T = T(x, y, t)$  e a geração de calor interna  $q''' = q'''(x, y, t)$ .

O problema trata-se apenas da transferência de calor por condução no interior do componente, de forma não uniforme em todo domínio em estudo.

### 2.3 - CONDIÇÕES DE CONTORNO E INICIAL

O modelamento matemático é feito para o primeiro quadrante da figura 2.1, devido a simetria existente no componente. A figura 2.2, ilustra as condições de contorno empregadas. A condição de isolamento na região superior do componente é devido as considerações iniciais do problema (esquema físico, figura 2.1) e as condições de isolamento na região lateral esquerda e na região inferior (figura 2.2), são resultantes da simetria geométrica.

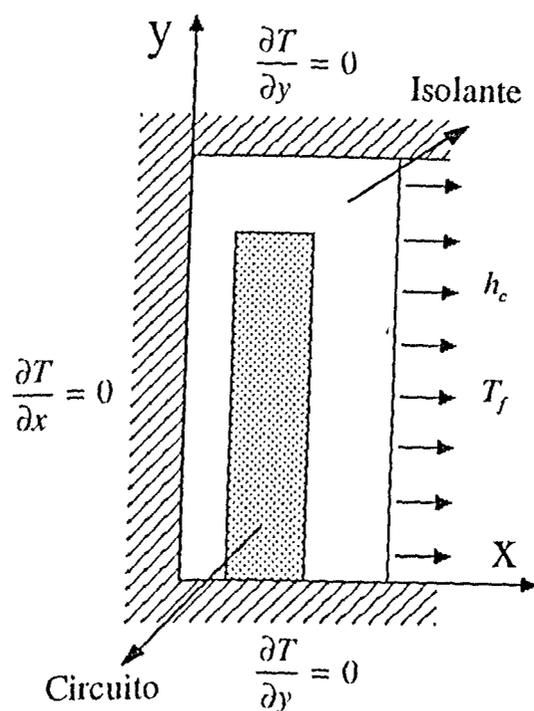


Fig. 2.2 - Esquema das condições de contorno.

A condição de  $T_f$  constante, simula a aquela em que o fluido de refrigeração estaria num processo de vaporização, ou que o fluxo de refrigerante fosse suficientemente intenso, para que se pudesse desprezar a sua variação de temperatura.

Pode-se escrever as condições de contornos, da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \text{para } x = 0 \quad (2.2)$$

$$-k_l \frac{\partial T}{\partial x} = h_c (T - T_f), \quad \text{para } x = L \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \text{para } y = 0 \text{ e } y = H \quad (2.4)$$

No instante inicial  $t = 0$ , tem-se,

$$T(x, y, 0) = T_i \quad (2.5)$$

## 2.4 - CALORES GLOBAIS E TAXAS ENVOLVIDAS

### 2.4.1 - Calor e taxa geradas pelo circuito.

O calor total gerado, é dado por:

$$Q_{sc} = \int \int_{V_C} \dot{q}'''(x, y, t) dV dt \quad (2.6)$$

A taxa global de calor gerado pelo circuito, é dada por:

$$\ddot{q}_{sc} = \int_{V_C} \dot{q}''' dV \quad (2.7)$$

### 2.4.2 - Calor e taxa armazenada pelo sistema.

O calor armazenado no isolante, é dado por:

$$Q_{al} = \int_{V_I} \rho C_{pl} (T - T_i) dV \quad (2.8)$$

e no circuito, por:

$$Q_{ac} = \int_{V_C} \rho C_{pc} (T - T_i) dV \quad (2.9)$$

O calor total armazenado, é dado por:

$$Q_t = Q_{aI} + Q_{aC} \quad (2.10)$$

e a taxa do calor armazenado, por:

$$\dot{q}_a = \frac{dQ_t}{dt} \quad (2.11)$$

### 2.4.3 - Calor e taxa perdida por convecção.

O calor global cedido por convecção ao fluido refrigerante, é

dado por:

$$Q_c = h_c \int_0^t \int_0^H (T_p(y) - T_f) dy dt \quad (2.12)$$

e a taxa de calor dissipada, por:

$$\ddot{q}_c = h_c \int_0^H (T_p(y) - T_f) dy \quad (2.13)$$

## 2.5 - POTÊNCIA GERADA PELO CIRCUITO

A potência dissipada pelos circuitos do componente eletrônico, poderá acontecer em três regimes de operação: contínua, intermitente, e de uma forma senoidal.

A figura 2.3, ilustra a geração interna de calor contínua, ao longo do tempo.

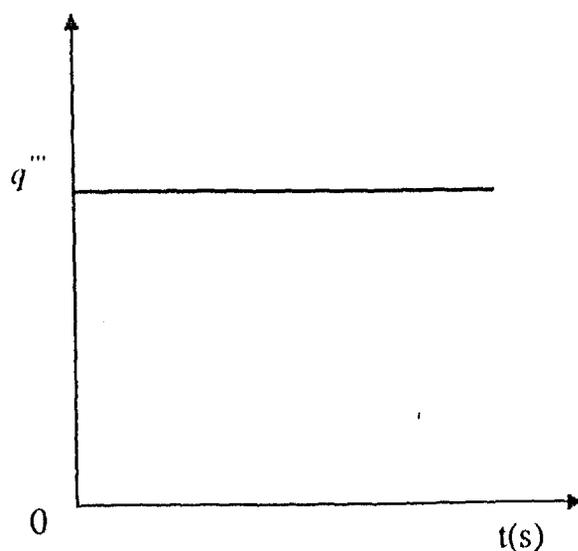


Figura 2.3 - Taxa de calor constante.

A figura 2.4, mostra a geração interna de calor intermitente, ao longo do tempo, do tipo *tudo ou nada*.

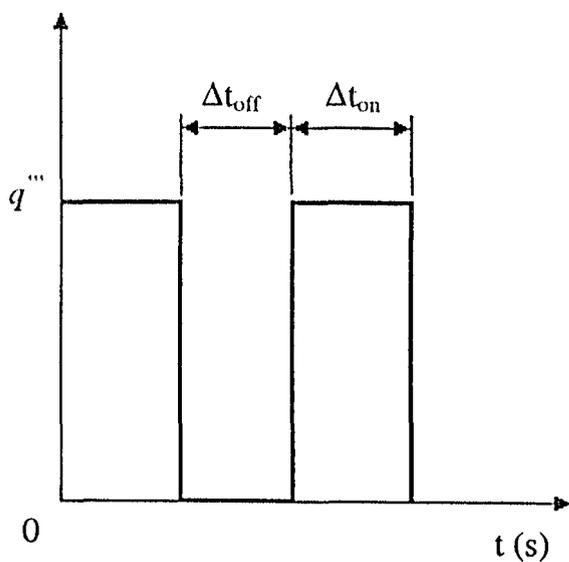


Figura 2.4 - Taxa de calor intermitente.

A figura 2.5, mostra o regime de operação na forma senoidal, ao longo do tempo.

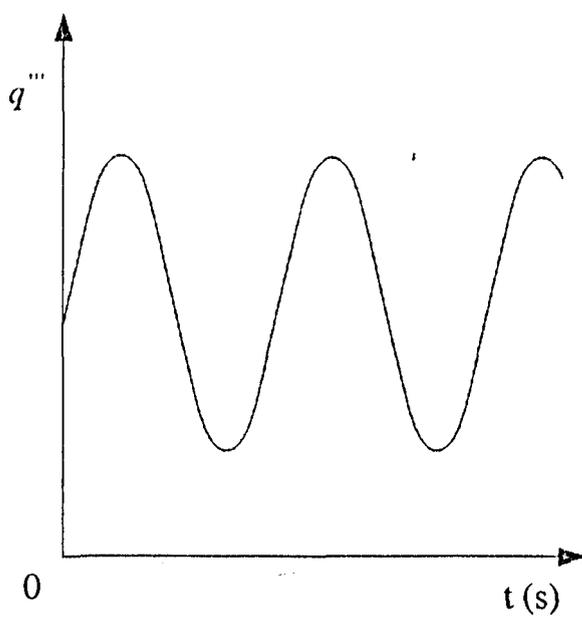


Figura 2.5 - Taxa de calor senoidal.

Isto é feito, para que o modelo considere variações, que normalmente possam ocorrer no regime de operação dos dispositivos eletrônicos.

## 2.6 - ADIMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Considera-se as seguintes variáveis adimensionais:

$$\theta = \frac{T - T_r}{T_r} \quad (2.14)$$

onde,  $\theta$  é a temperatura adimensional, e  $T_r$  é uma temperatura de referência.

$$F_0 = \frac{t}{t_0} \quad (2.15)$$

$F_0$  é o número fourier, com  $t_0$  definido como:

$$t_0 = \frac{H^2 \rho_I C_{pI}}{k_I} \quad (2.16)$$

e as variáveis geométricas como:

$$X = \frac{x}{H} \quad \text{e} \quad Y = \frac{y}{H} \quad (2.17)$$

As propriedades físicas, são adimensionalizadas em relação as propriedades do isolante, resultando em:

Condutividade térmica adimensional,

$$\bar{k} = \frac{k(x, y)}{k_I} \quad (2.18)$$

Densidade adimensional,

$$\bar{\rho} = \frac{\rho(x, y)}{\rho_I} \quad (2.19)$$

Calor específico adimensional,

$$\bar{C}_p = \frac{C_p(x, y)}{C_{pI}} \quad (2.20)$$

Define-se ainda o número de Biot, como:

$$Bi = \frac{h_c H}{k_I} \quad (2.21)$$

Levando essas variáveis assim definidas, na equação apresentada na formulação do problema (equação 2.1), obtêm-se a equação da energia adimensional, na forma:

$$\bar{\rho} \bar{C}_p \left( \frac{\partial \theta}{\partial F_0} \right) = \bar{k} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right) + F \quad (2.22)$$

onde  $F$  é o termo fonte adimensional, dado por:

$$F = q^m \frac{H^2}{k_l T_r} \quad (2.23)$$

Para as condições de contorno e inicial, vem:

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad \text{em} \quad X = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} = -Bi(\theta + c_1) \quad \text{em} \quad X = \bar{L} = \frac{L}{H} \quad (2.25)$$

onde,  $c_1$  é dados por:

$$c_1 = 1 - \frac{T_f}{T_r} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{em} \quad Y = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial Y} = 0 \quad \text{em} \quad Y = 1 \quad (2.28)$$

Para o instante inicial, tem-se,

$$\theta = \theta_i \quad (2.29)$$

### 3 - SOLUÇÃO NUMÉRICA

#### 3.1 - DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES.

Para se resolver numericamente a equação de conservação de energia, acopladas às condições iniciais e de contorno (equações 2.22 a 2.27), utiliza-se a técnica dos volumes de controle finitos desenvolvida por Patankar, (1980), para discretizá-las.

A figura 3.1, determina o esquema e a nomenclatura empregada na discretização.

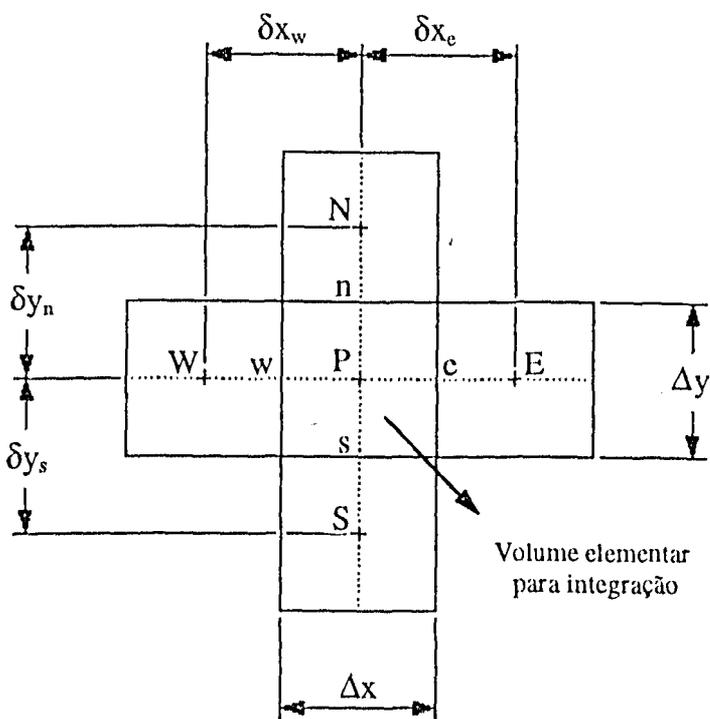


Figura 3.1 - Esquema de discretização com a nomenclatura empregada.



Os diferentes termos da equação adimensional da conservação de energia (equação 2.22), são integrados no volume de controle mostrado na figura 3.1, daí temos:

$$\int_s^n \int_w^e \int_{F_0}^{F_0+dF_0} \bar{\rho} \bar{C}_p \left( \frac{\partial \theta}{\partial F_0} \right) dXdYdF_0 = \bar{\rho} \bar{C}_p (\theta_P - \theta_P^0) \Delta x \Delta y \quad (3.1)$$

$$\int_s^n \int_w^e \int_{F_0}^{F_0+dF_0} \bar{k} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right) dXdYdF_0 = \bar{k} \left[ \frac{(\theta_E - \theta_P)}{(\delta x)_e} - \frac{(\theta_P - \theta_w)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta F_0 \quad (3.2)$$

$$\int_s^n \int_w^e \int_{F_0}^{F_0+dF_0} \bar{k} \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) dXdYdF_0 = \bar{k} \left[ \frac{(\theta_N - \theta_P)}{(\delta y)_e} - \frac{(\theta_P - \theta_s)}{(\delta y)_w} \right] \Delta x \Delta F_0 \quad (3.3)$$

$$\int_s^n \int_w^e \int_{F_0}^{F_0+dF_0} F dXdYdF_0 = F \Delta x \Delta y \Delta F_0 \quad (3.4)$$

Agrupando-os (equações 3.1 à 3.4), obtêm-se:

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \bar{C}_p (\theta_P - \theta_P^0) \Delta x \Delta y &= \bar{k} \left[ \frac{(\theta_E - \theta_P)}{(\delta x)_e} - \frac{(\theta_P - \theta_w)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta F_0 + \\ &+ \bar{k} \left[ \frac{(\theta_N - \theta_P)}{(\delta y)_n} - \frac{(\theta_P - \theta_s)}{(\delta y)_s} \right] \Delta x \Delta F_0 + F \Delta x \Delta y \Delta F_0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

que é a equação geral da conservação de energia, totalmente discretizada.

Reagrupando os termos da equação 3.5, vem:

$$A_P \theta_P = A_P^0 \theta_P^0 + \bar{k} A_E \theta_E + \bar{k} A_w \theta_w + \bar{k} A_N \theta_N + \bar{k} A_s \theta_s + S_P \quad (3.6)$$

onde,

$$A_p = A_p^0 + \bar{k}A_E + \bar{k}A_w + \bar{k}A_N + \bar{k}A_S \quad (3.7)$$

$$A_p^0 = \bar{\rho} \bar{C}_p \frac{\Delta x \Delta y}{\Delta F_0} \quad (3.8)$$

$$A_E = \frac{\Delta y}{(\delta x)_e} \quad (3.9)$$

$$A_w = \frac{\Delta y}{(\delta x)_w} \quad (3.10)$$

$$A_N = \frac{\Delta x}{(\delta y)_n} \quad (3.11)$$

$$A_S = \frac{\Delta x}{(\delta y)_s} \quad (3.12)$$

$$S_p = F \Delta x \Delta y \quad (3.13)$$

Na interface isolante/circuito, faz-se necessário um tratamento especial na condutividade térmica dos materiais, definindo-se portanto uma condutividade térmica equivalente, na forma:

$$k_{IC} = 2 \frac{k_c k_I}{k_c + k_I} \quad (3.14)$$

Considerando as condições de contorno e a condutividade

térmica equivalente, como definido em 3.14 e adequando a equação da energia para os diferentes tipos de volumes de controle que aparecem no domínio (figura 3.2), obtêm-se as seguintes equações:

### Tipo 1

$$A_P \theta_P = A_{PI}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_N \theta_N$$

onde,

(3.15)

$$A_P = A_{PI}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_N$$

### Tipo 2

$$A_P \theta_P = A_{PI}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N$$

onde,

(3.16)

$$A_P = A_{PI}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N$$

### Tipo 3

$$A_P \theta_P = A_{PI}^0 \theta_P^0 + \overline{k_{IC}} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N$$

onde,

(3.17)

$$A_P = A_{PI}^0 + \overline{k_{IC}} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N$$

### Tipo 4

$$A_P \theta_P = A_{PC}^0 \theta_P^0 + \overline{k_C} A_E \theta_E + \overline{k_{IC}} A_W \theta_W + \overline{k_C} A_N \theta_N + S_P$$

onde,

(3.18)

$$A_P = A_{PC}^0 + \overline{k_C} A_E + \overline{k_{IC}} A_W + \overline{k_C} A_N$$

**Tipo 5**

$$A_P \theta_P = A_{P_C}^0 \theta_P^0 + \overline{k_C} A_E \theta_E + \overline{k_C} A_W \theta_W + \overline{k_C} A_N \theta_N + S_P$$

onde,

$$A_P = A_{P_C}^0 + \overline{k_C} A_E + \overline{k_C} A_W + \overline{k_C} A_N$$

(3.19)

**Tipo 6**

$$A_P \theta_P = A_{P_C}^0 \theta_P^0 + \overline{k_{IC}} A_E \theta_E + \overline{k_C} A_W \theta_W + \overline{k_C} A_N \theta_N + S_P$$

onde,

$$A_P = A_{P_C}^0 + \overline{k_{IC}} A_E + \overline{k_C} A_W + \overline{k_C} A_N$$

(3.20)

**Tipo 7**

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_{IC}} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_{IC}} A_W + \overline{k_I} A_N$$

(3.21)

**Tipo 8**

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N$$

(3.22)

**Tipo 9**

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_W \theta_W - BiCl\Delta y + \overline{k_I} A_N \theta_N$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N + Bi\Delta y$$

(3.23)

## Tipo 10

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_N + \overline{k_I} A_S$$

(3.24)

## Tipo 11

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N + \overline{k_I} A_S$$

(3.25)

## Tipo 12

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_{IC}} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_{IC}} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N + \overline{k_I} A_S$$

(3.26)

## Tipo 13

$$A_P \theta_P = A_{P_C}^0 \theta_P^0 + \overline{k_C} A_E \theta_E + \overline{k_{IC}} A_W \theta_W + \overline{k_C} A_N \theta_N + \overline{k_C} A_S \theta_S + S_P$$

onde,

$$A_P = A_{P_C}^0 + \overline{k_C} A_E + \overline{k_{IC}} A_W + \overline{k_C} A_N + \overline{k_C} A_S$$

(3.27)

## Tipo 14

$$A_P \theta_P = A_{P_C}^0 \theta_P^0 + \overline{k_C} A_E \theta_E + \overline{k_C} A_W \theta_W + \overline{k_C} A_N \theta_N + \overline{k_C} A_S \theta_S + S_P$$

onde,

$$A_P = A_{P_C}^0 + \overline{k_C} A_E + \overline{k_C} A_W + \overline{k_C} A_N + \overline{k_C} A_S$$

(3.28)

**Tipo 15**

$$A_P \theta_P = A_{PC}^0 \theta_P^0 + \overline{k_{IC}} A_E \theta_E + \overline{k_C} A_W \theta_W + \overline{k_C} A_N \theta_N + \overline{k_C} A_S \theta_S + S_P$$

onde, (3.29)

$$A_P = A_{PC}^0 + \overline{k_{IC}} A_E + \overline{k_C} A_W + \overline{k_C} A_N + \overline{k_C} A_S$$

**Tipo 16**

$$A_P \theta_P = A_{PI}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_{IC}} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde, (3.30)

$$A_P = A_{PI}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_{IC}} A_W + \overline{k_I} A_N + \overline{k_I} A_S$$

**Tipo 17**

$$A_P \theta_P = A_{PI}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde, (3.31)

$$A_P = A_{PI}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N + \overline{k_I} A_S$$

**Tipo 18**

$$A_P \theta_P = A_{PI}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_I} A_S \theta_S - BiCl \Delta y$$

onde, (3.32)

$$A_P = A_{PI}^0 + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N + \overline{k_I} A_S + Bi \Delta y$$

**Tipo 19**

$$A_P \theta_P = A_{PC}^0 \theta_P^0 + \overline{k_C} A_E \theta_E + \overline{k_{IC}} A_W \theta_W + \overline{k_{IC}} A_N \theta_N + \overline{k_C} A_S \theta_S + S_P$$

onde, (3.33)

$$A_P = A_{PC}^0 + \overline{k_C} A_E + \overline{k_{IC}} A_W + \overline{k_{IC}} A_N + \overline{k_C} A_S$$

## Tipo 20

$$A_p \theta_p = A_{PC}^0 \theta_p^0 + \overline{k_C} A_E \theta_E + \overline{k_C} A_W \theta_W + \overline{k_{IC}} A_N \theta_N + \overline{k_C} A_S \theta_S + S_p$$

onde, (3.34)

$$A_p = A_{PC}^0 + \overline{k_C} A_E + \overline{k_C} A_W + \overline{k_{IC}} A_N + \overline{k_C} A_S$$

## Tipo 21

$$A_p \theta_p = A_{PC}^0 \theta_p^0 + \overline{k_{IC}} A_E \theta_E + \overline{k_C} A_W \theta_W + \overline{k_{IC}} A_N \theta_N + \overline{k_C} A_S \theta_S + S_p$$

onde, (3.35)

$$A_p = A_{PC}^0 + \overline{k_{IC}} A_E + \overline{k_C} A_W + \overline{k_{IC}} A_N + \overline{k_C} A_S$$

## Tipo 22

$$A_p \theta_p = A_{PI}^0 \theta_p^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde, (3.36)

$$A_p = A_{PI}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N + \overline{k_I} A_S$$

## Tipo 23

$$A_p \theta_p = A_{PI}^0 \theta_p^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_{IC}} A_S \theta_S$$

onde, (3.37)

$$A_p = A_{PI}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N + \overline{k_{IC}} A_S$$

## Tipo 24

$$A_p \theta_p = A_{PI}^0 \theta_p^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde, (3.38)

$$A_p = A_{PI}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N + \overline{k_I} A_S$$

## Tipo 25

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_N \theta_N + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_N + \overline{k_I} A_S$$

(3.39)

## Tipo 26

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_S$$

(3.40)

## Tipo 27

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_E \theta_E + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_S \theta_S$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_I} A_E + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_S$$

(3.41)

## Tipo 28

$$A_P \theta_P = A_{P_I}^0 \theta_P^0 + \overline{k_I} A_W \theta_W + \overline{k_I} A_S \theta_S - BiCl\Delta y$$

onde,

$$A_P = A_{P_I}^0 + \overline{k_I} A_W + \overline{k_I} A_S + Bi\Delta y$$

(3.42)

Estas equações formaram os sistemas de equações lineares resolução do problema.

## 4 - PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

### 4.1 - INTRODUÇÃO.

Os sistemas de equações lineares, para o campo de temperatura no componente eletrônico (equações 3.20 a 3.47), são resolvidas através do método de iterativo linha a linha, conhecido como algoritmo de Thomas ou simplesmente TDMA (TriDiagonal Matrix Algorithm).

O método TDMA é o mais conhecido desta natureza, para problemas bidimensionais, é iterativo, com a varredura processando-se linha por linha e coluna por coluna. Para descrever o método utiliza-se a equação 3.6 e ainda considera-se a figura 4.1, que mostra uma linha na qual aplica-se o método TDMA.

Escreve-se a equação 3.6, de forma mais conveniente para as componentes unitárias  $i, j$  de maneira a representar a forma tridiagonal. Os termos relativos aos pontos  $W, P$  e  $E$ , são separados do lado esquerdo da igualdade, e o restante dos termos do lado direito, daí obtendo-se a equação que será representada na forma matricial,  $[A] [\theta] = [B]$ .

$$- \bar{k}A_W \theta_{i-1,j} + A_P \theta_{i,j} - \bar{k}A_E \theta_{i+1,j} = B_{i,j} \quad (4.1)$$

onde,

$$B_{i,j} = A_P^0 \theta_{i,j}^0 + \bar{k} A_N \theta_{i,j+1} + \bar{k} A_S \theta_{i,j-1} + S p_{i,j} \quad (4.2)$$

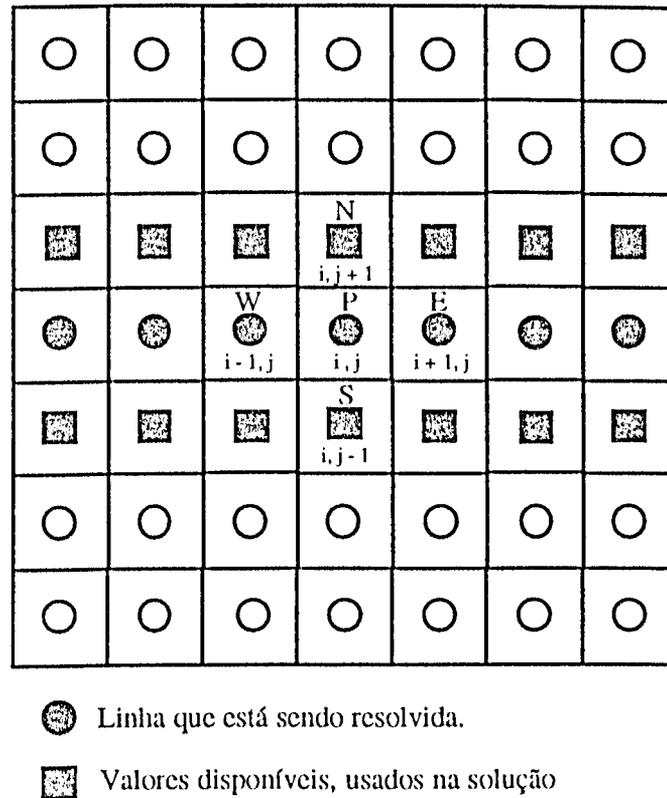


Figura 4.1 - Linha na qual aplica-se o método TDMA [11].

Identifica-se  $[A]$  como matriz dos coeficientes,  $[\theta]$  como vetor solução do problema e  $[B]$  como vetor que representa todos os termos do lado direito da equação 4.1.

Para compor a matriz dos coeficiente, os termos do lado esquerdo da igualdade da equação 4.1, são separados em diagonais, como

segue:

$$\text{Diagonal inferior:} \quad DI = -\bar{k}A_W \quad (4.3)$$

$$\text{Diagonal principal:} \quad DP = A_P \quad (4.4)$$

$$\text{Diagonal superior:} \quad DS = -\bar{k}A_E \quad (4.5)$$

As variáveis relativas a temperatura em cada termo do lado esquerdo da equação 4.1, constituíram o vetor campo de temperatura, que é a solução do problema para a linha na qual está sendo feito a varredura. A medida que o método TDMA vai resolvendo linha a linha o problema, os vetores respostas são armazenados em uma matriz campo de temperatura para aquele instante de tempo, denominado como instante atual. O vetor resposta tem a configuração mostrada na figura 4.2, onde cada linha do vetor representa a temperatura no ponto central ( $P$ ), de cada volume de controle varrido.

O vetor  $[B]$ , é formado a partir dos termos do lado direito da igualdade da equação 4.1. Este vetor corresponde a equação 4.2 e tem a forma apresentada na figura 4.2, onde cada linha do vetor representa um volume de controle, onde aplicou-se a equação 3.6, com as respectivas condições de contornos.



## 4.2 - FLUXOGRAMA COMPUTACIONAL

O procedimento de cálculo, é apresentado nos fluxogramas que seguem:

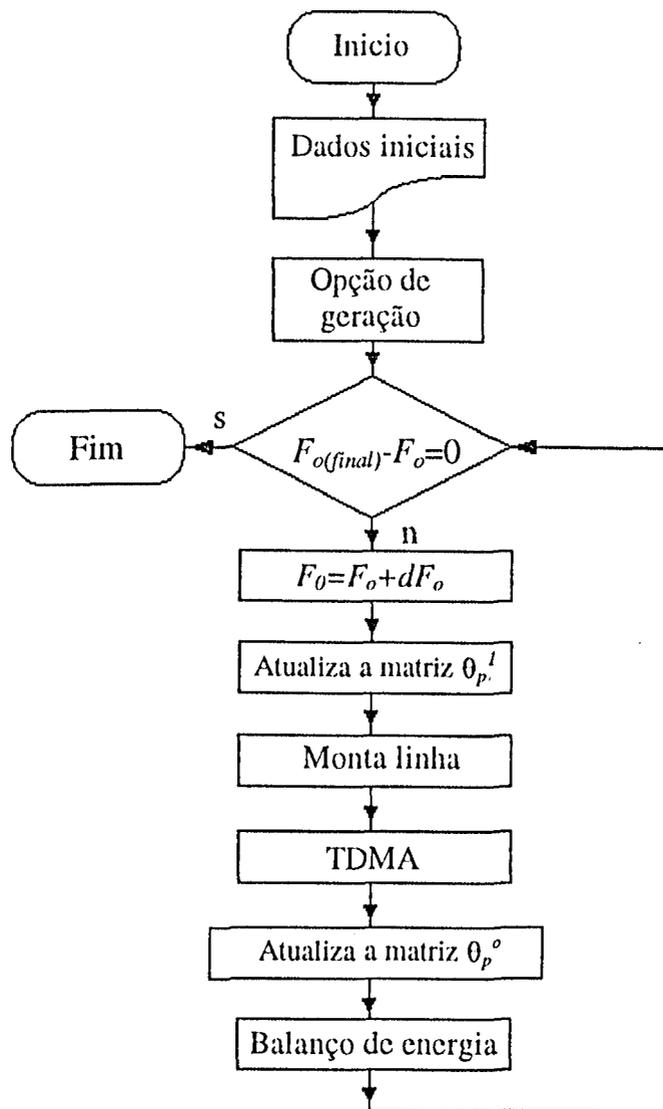


Figura 4.3 - Fluxograma geral do programa computacional.

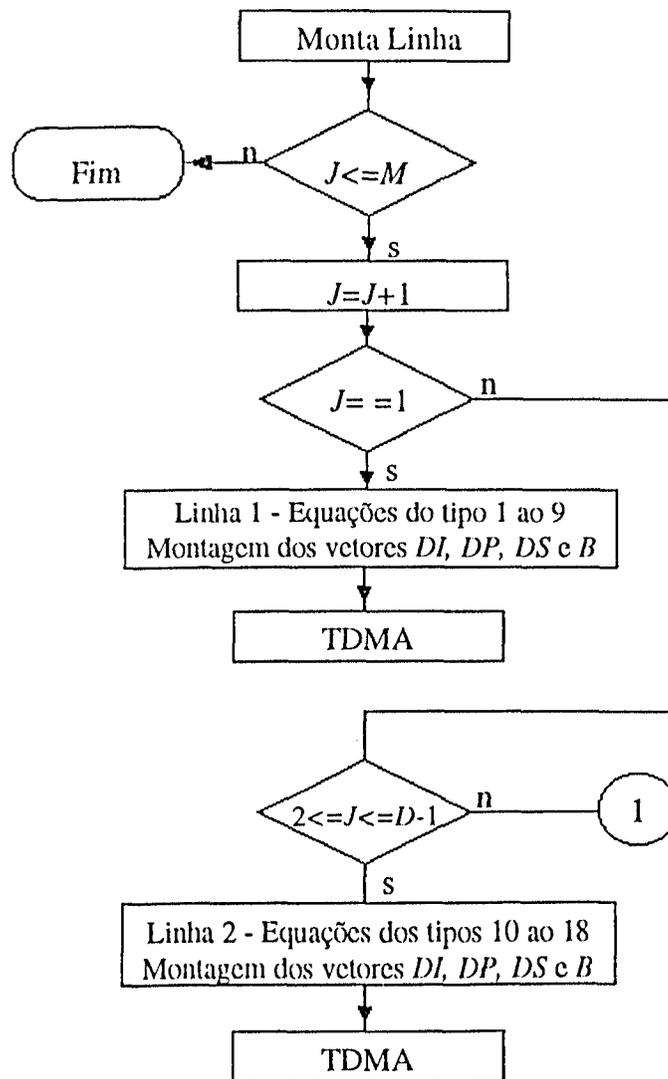


Figura 4.4a - Fluxograma da função que monta as linhas da matriz temperatura.

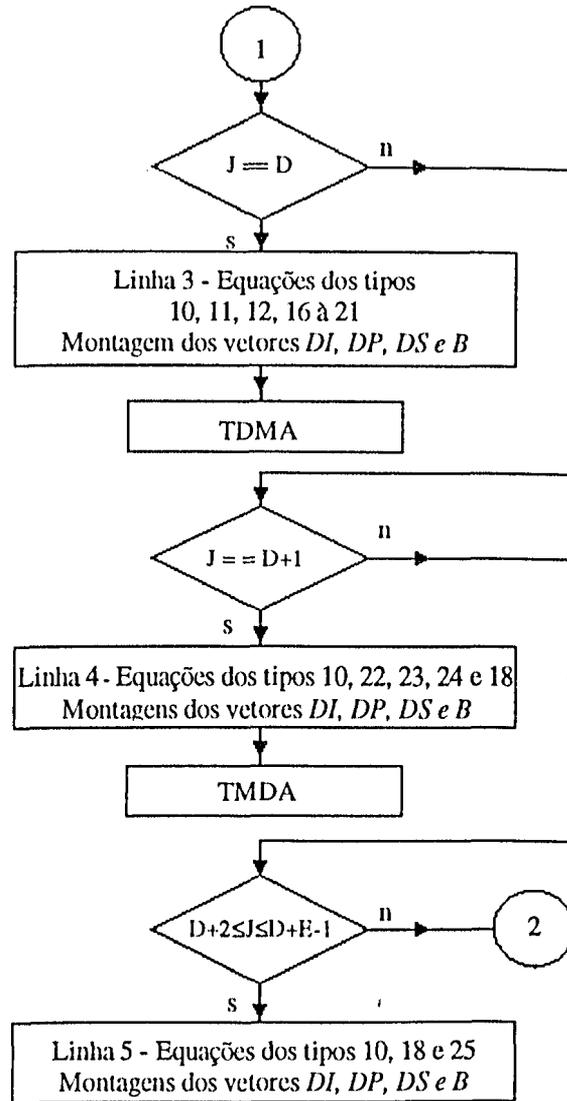


Figura 4.4b - Fluxograma da função que monta as linhas da matriz temperatura.

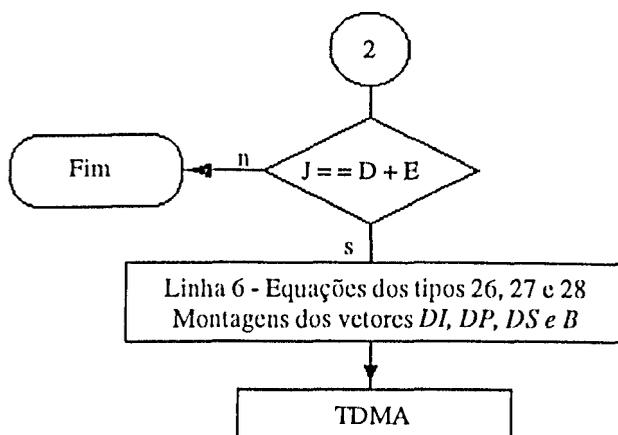


Figura 4.4c - Fluxograma da função que monta as linhas da matriz temperatura.

### 4.3 - PROGRAMA COMPUTACIONAL

O programa computacional utiliza a linguagem C, e é compilado no turbo C++, versão 3.0 da Borland International Inc., e executado em um micro computador Pentium-IBM 350-P90.

O programa é estruturado de maneira a possibilitar obter condições de simulação diversificadas, bastando modificar valores de entrada, tais como a temperatura inicial, a temperatura do fluido de resfriamento, a geração interna de calor, número de biot, as propriedades termo-físicas do material isolante e do circuito e os parâmetros geométricos da malha.

O programa também permite de maneira simples a introdução de diferentes regimes de geração interna de calor no dispositivo, e pode ser adaptado para geometria com mais de duas placas paralelas de circuitos.

## 5 - RESULTADOS

### 5.1 - INTRODUÇÃO

Apresentam-se aqui resultados obtidos através da simulação numérica do modelo proposto para duas configurações geométricas distintas, mostradas na tabela 5.1.

A primeira configuração consiste em uma geometria com duas placas paralelas de circuitos (figura 5.1), para qual são apresentadas os resultados em regimes de geração interna de calor contínua, intermitente e senoidal. A segunda configuração geométrica apresentada, é constituída por três placas paralelas (figura 5.2), para qual são apresentadas os resultados para o regime de geração interna de calor contínua.

Para as duas configurações, são mantidas iguais as condições iniciais de simulação (Tabela 5.2).

Tabela 5.1 - Configuração e dimensões geométricas.

Componente eletrônico com:	Dimensões geométricas das figuras 5.1 e 5.2 em metros							
	H	L	A	B	C	D	E	F
2 Circuitos	0,0010	0,0019	0,0003	0,0010	0,0006	0,0087	0,0013	-
3 Circuitos	0,0010	0,0027	0,0006	0,0010	0,0006	0,0087	0,0013	0,0005

Tabela 5.2 - Condições iniciais de simulação.

Regime de trabalho	Propriedades termo-físicas										
	$q'''$	$T_f$	$T_i$	$T_r$	$Bi$	$\rho_l$	$\rho_c$	$Cp_l$	$Cp_c$	$k_l$	$k_c$
	$W/m^3$	$K$	$K$	$K$	-	$Kg/m^3$	$Kg/m^3$	$J/Kg.K$	$J/Kg.K$	$W/mK$	$W/mK$
Contínuo											
Intermitente $\Delta t_{on} = 10 s$ e $\Delta t_{off} = 5 s$	$10^7$	273	273	300	1,0	1300	2330	1465	712	1,4	148
senoidal com freqüência = $\pi/5$											

A figura 5.1, mostra a configuração geométrica para o primeiro quadrante do componente eletrônico, com dois circuitos.

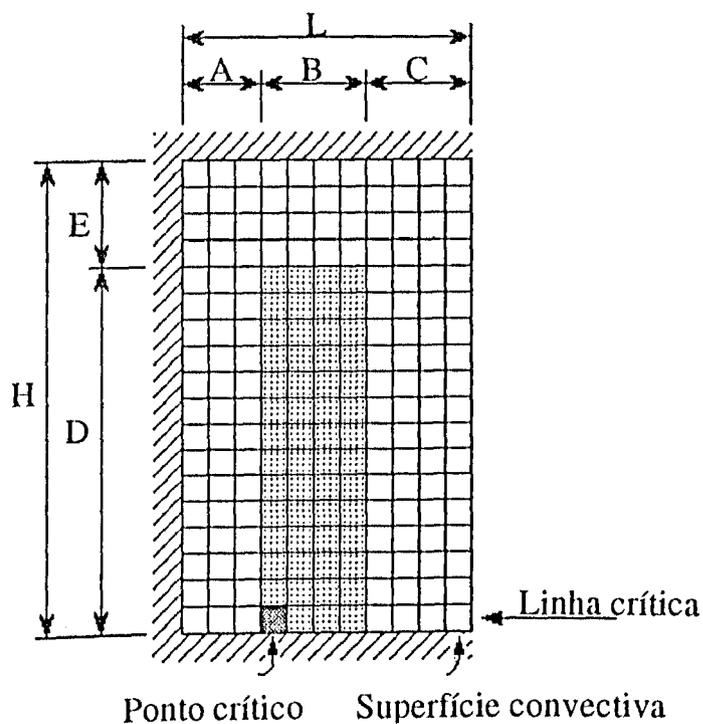


Figura 5.1 - Nomenclatura utilizada para configuração geométrica com duas placas paralelas de circuitos.

A figura 5.2, ilustra a configuração geométrica para o primeiro quadrante do componente eletrônico, com três circuitos.

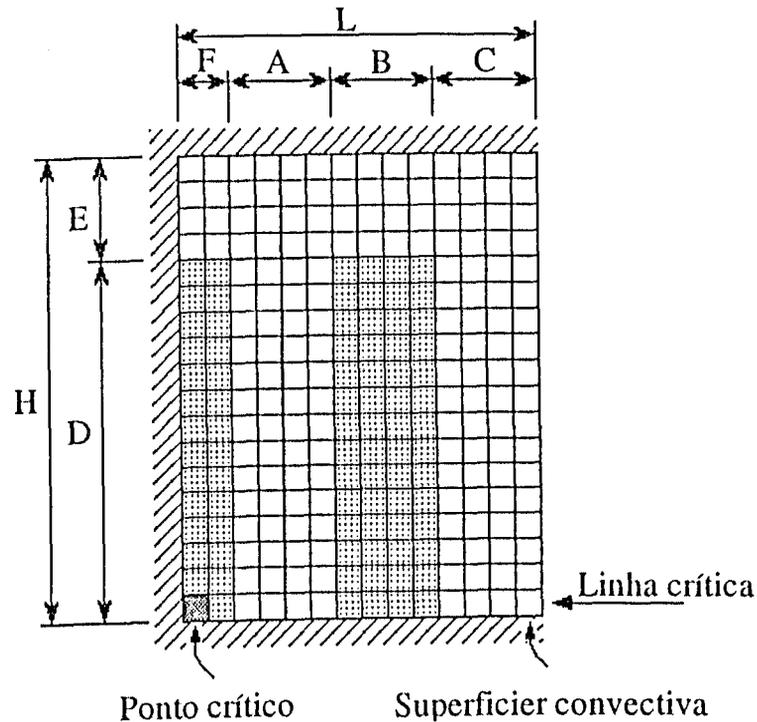


Figura 5.2 - Nomenclatura utilizada para configuração geométrica com três placas paralelas de circuitos.

Afim de executar as análises durante a apresentação dos resultados define-se como, *Ponto crítico* é o ponto localizado na malha onde devem ser atingidos os maiores níveis de temperatura, devido localizar-se em uma região de geração de calor e também está distante da superfície convectiva. *Linha crítica*, é a fileira central de volumes de controle na direção  $x$ , que possui perfis com maiores níveis de temperaturas e denomina-se como

*superfície convectiva* a última fileira de volumes de controle na direção  $y$ , onde ocorre a transferência de calor por convecção. As figuras 5.1 e 5.2, ilustram essas definições.

Utiliza-se os resultados apresentados para o regime de geração interna de calor contínua para fazer a validação dos resultados.

Ensaio com o objetivo de verificar e analisar a influência dos parâmetros geométricos e de transferência de calor, são apresentados em capítulo a seguir.

## 5.2 - REGIME CONTÍNUO DE GERAÇÃO INTERNA DE CALOR, COM DUAS PLACAS PARALELAS DE CIRCUITOS

Apresentam-se os resultados para a configuração geométrica com dois circuitos paralelos, em regime contínuo de geração interna de calor, os quais são utilizados para a validação do modelo numérico.

A figura 5.3, ilustra o balanço de energia, mostrando as curvas de calor gerado, armazenado e perdido por convecção, conforme calculados pelas equações 2.6, 2.10 e 2.12.

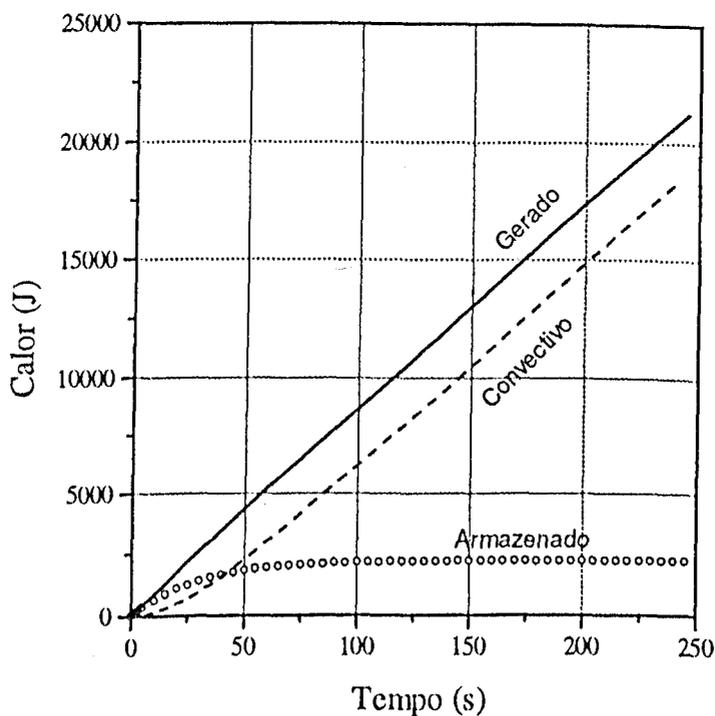


Figura 5.3 - Curvas dos calores envolvidos, para o regime contínuo.

Como esperado, o calor gerado aumenta com taxa constante de crescimento a partir do instante inicial, enquanto que a taxa de crescimento do calor perdido por convecção aumenta lentamente nos primeiros instantes, tendendo a crescer na mesma taxa do calor gerado. Isto ocorre, a partir do instante em que a quantidade de calor armazenada no componente eletrônico, permanece constante ao longo do tempo, caracterizando o regime permanente.

A figura 5.4, ilustra o comportamento com o tempo das taxas globais, onde observa-se a potência gerada pelo circuito, a armazenada no isolante e no circuito, e a potência cedida por convecção para o fluido de arrefecimento.

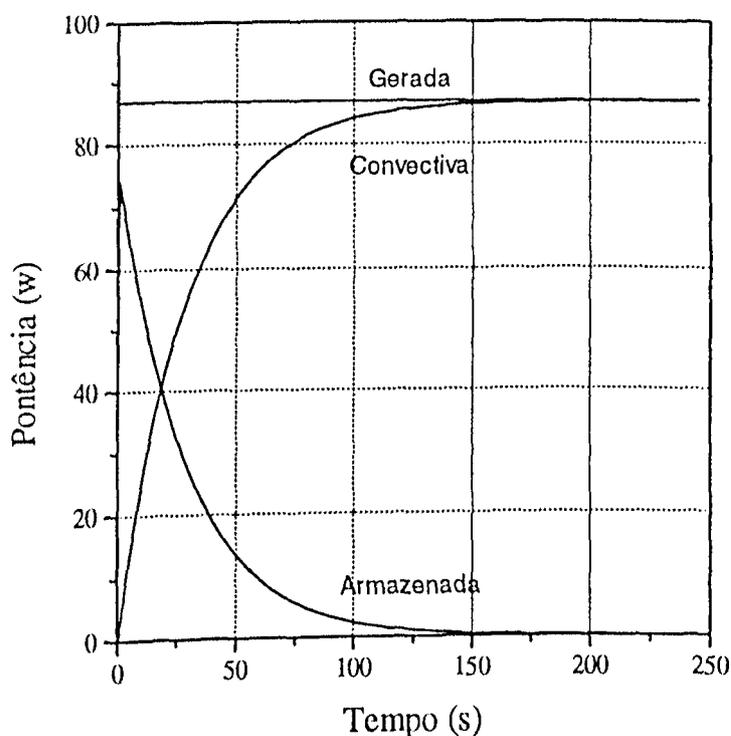


Figura 5.4 - Taxas globais envolvidas, para o regime contínuo.

A figura 5.5, mostra as curvas de calor armazenados no isolante e no circuito.

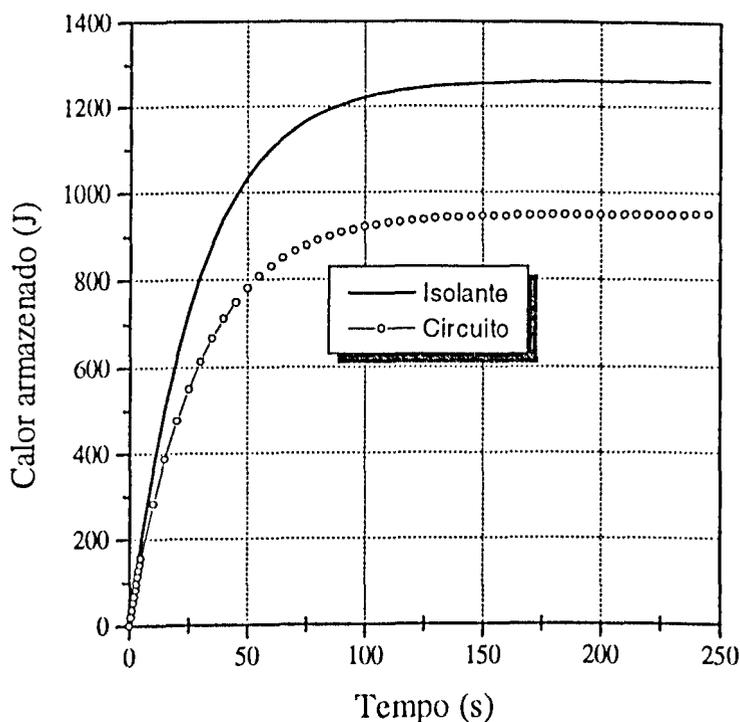


Figura 5.5 - Calor armazenado no isolante e no circuito, para o regime contínuo.

No isolante é armazenada uma quantidade de energia maior, do que no circuito. Isto é devido a quantidade de massa do isolante, ser maior do que a do circuito, além do calor específico do material isolante ser aproximadamente duas vezes maior do que aquele do circuito.

A figura 5.6, mostra o comportamento da temperatura no ponto crítico ao longo do tempo.

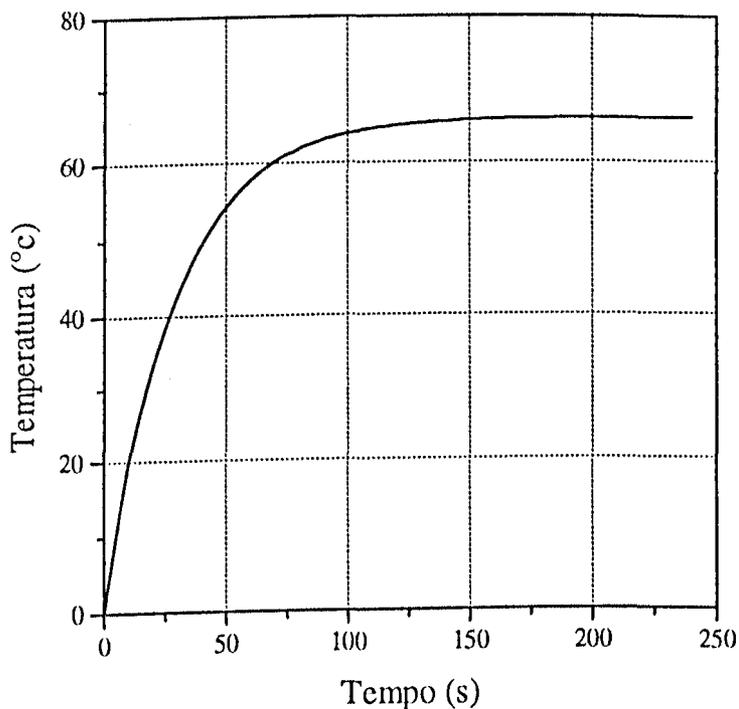


Figura 5.6 - Variação da temperatura no ponto crítico, para o regime contínuo.

Observa-se que esta temperatura aumenta ao longo do tempo, tornando-se constante em torno dos 66°C, instante em que o regime permanente é atingido.

A figura 5.7, apresenta os perfis de temperatura na superfície convectiva, para diferentes instantes de tempo, onde observa-se a

bidimensionalidade do problema para a geometria em questão. Verifica-se que o perfil sofre uma variação abrupta no gradiente de temperatura, ao sair da região referente a geração interna de calor.

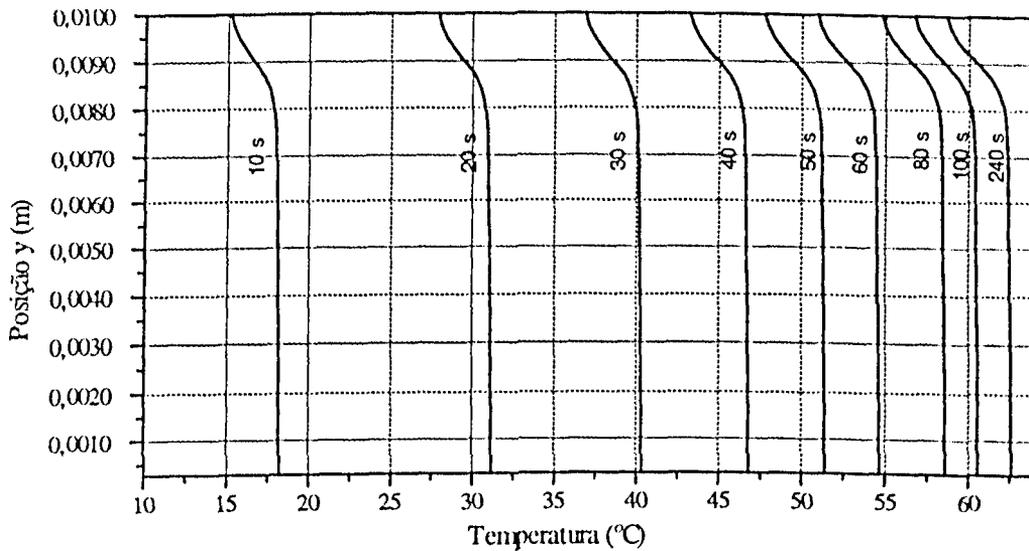


Figura 5.7 - Perfis de temperatura na superfície convectiva, para o regime contínuo.

A figura 5.8, mostra os perfis de temperatura na linha crítica para diferentes instantes de tempo, que também apresenta tendência bidimensional.

Os perfis de temperatura sofre uma inclinação mais acentuada

a partir de 0,0013 m, onde ocorre a variação da condutividade térmica.

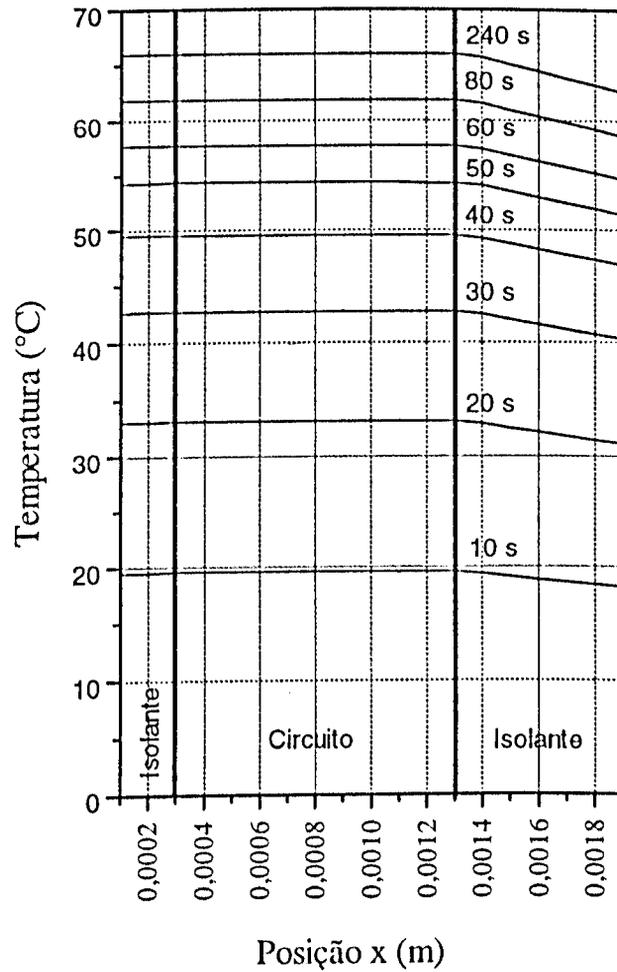


Figura 5.8 - Perfis de temperatura na linha crítica, para o regime contínuo.

### 5.3 - VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a validação do modelo numérico proposto, utiliza-se os resultados obtidos no item 5.2. O balanço de energia é feito calculando-se o calor gerado (equação 2.7), o calor armazenado no isolante e no circuito (equação 2.11), e calor perdido por convecção (equação 2.13), onde a soma desses calores em cada instante de tempo, deve ser igual ao calor gerado pelo sistema, isto é:

$$Q_g = (Q_{a_i} + Q_{a_c}) + Q_c \quad (5.1)$$

A figura 5.3, ilustra este balanço de energia, mostrando as curvas de calor gerado, armazenado e perdido por convecção, onde observa-se que para cada instante de tempo é obedecido a conservação de energia.

Para cada instante de tempo, definiu-se um erro percentual, definido da seguinte maneira,

$$Erro(\%) = \frac{(Q_{a_i} + Q_{a_c} + Q_c) - Q_g}{Q_g} \times 100 \quad (5.2)$$

A figura 5.9, mostra o erro percentual da solução numérica ao longo do transiente, até que o regime permanente é atingido.

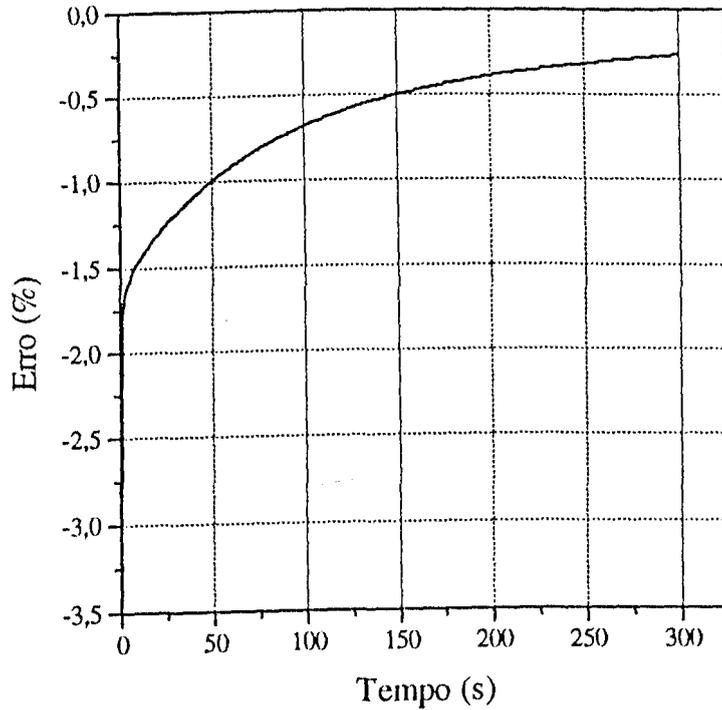


Figura 5.9 - Erro percentual no transiente.

Testes foram realizados no intuito de comparar os resultados encontrados através da solução numérica do problema em regime permanente com resultados encontrados pela solução do problema transiente quando atinge-se o regime permanente. Os resultados encontrados para o campo de temperatura mostraram boa concordância, apresentando diferença inferior a 1%.

Após intensa investigação numérica visando otimização do processo iterativo na busca do menor tempo computacional, obteve-se bons resultados, quando encontrou-se o incremento de  $10^{-7}$  para o número de Fourier, com erro variando de -1,80% nas primeiras iterações, reduzindo-se

para -0,23% quando o programa atinge o regime permanente, utilizando-se uma malha de 19 x 38. Malha duas vezes menor, apresentou resultados que não variaram mais de 0,5%, enquanto que o tempo computacional aumento significativamente. Trabalhando com um passo de tempo maior,  $10^{-6}$ , mantendo-se as mesmas condições iniciais de simulação e malha, o erro vária de -15% nas primeiras iterações reduzindo-se para -1,5% ao atingir o regime permanente, representando uma variação inferior a 0,5% no valor do gradiente de temperatura em regime permanente.

#### 5.4 - REGIME INTERMITENTE DE GERAÇÃO INTERNA DE CALOR, COM DUAS PLACAS PARALELAS DE CIRCUITOS

Apresentam-se os resultados para o regime intermitente de geração interna de calor, do tipo “tudo ou nada”, para a configuração geométrica com dois circuitos paralelos.

A figura 5.10, mostra o balanço de energia, mostrando as curvas de calor gerado, armazenado e perdido por convecção ao fluido de arrefecimento.

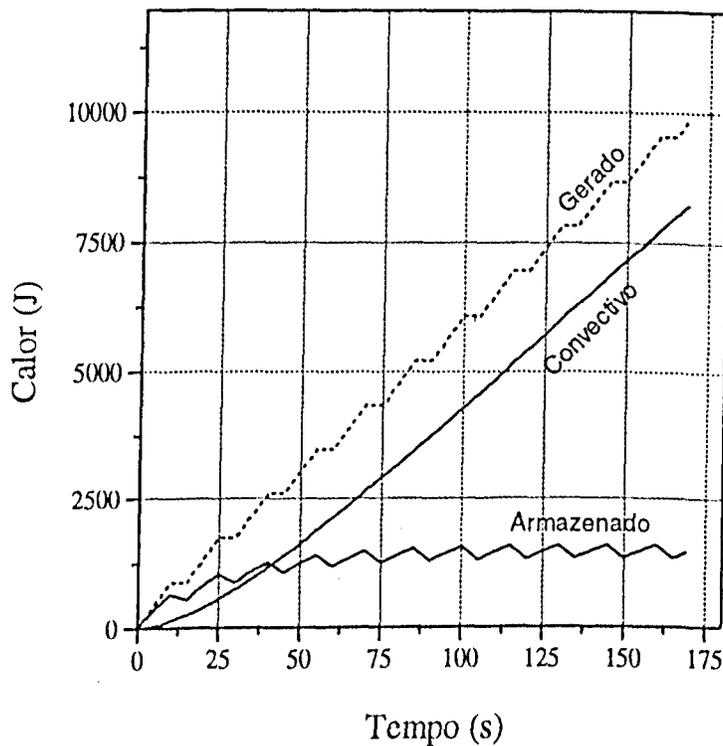


Figura 5.10 - Curvas dos calores envolvidos, para o regime intermitente.

Observa-se que o comportamento das curvas seguem as mesmas tendências das curvas apresentadas no regime contínuo, diferenciando-se em virtude da intermitência do regime de geração interna de calor. Verifica-se que a soma dos calores armazenado e perdido por convecção em cada instantes de tempo é igual ao calor gerado.

A figura 5.11, mostra as curvas das taxas globais, onde observa-se a potência gerada pelo circuito, a potência armazenada pelo sistema, e a potência dissipada por convecção ao fluido de resfriamento, onde também por ser evidenciado o processo intermitente de fornecimento de calor.

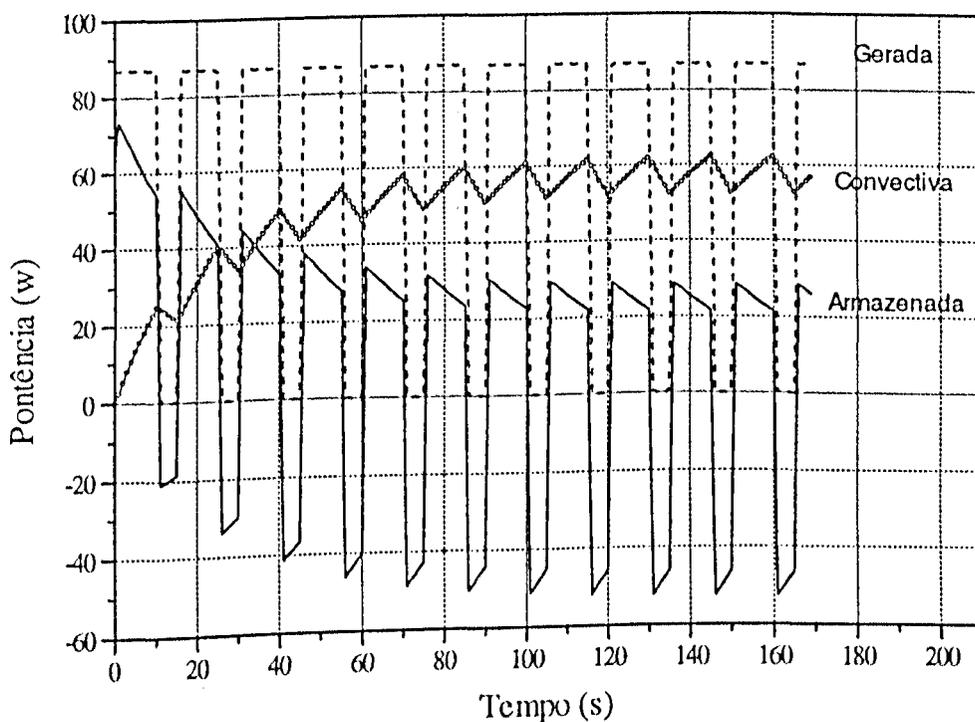


Figura 5.11 - Taxas globais envolvidas, para o regime intermitente.

A figura 5.12, apresenta as curvas de calor armazenados no isolante e no circuito.

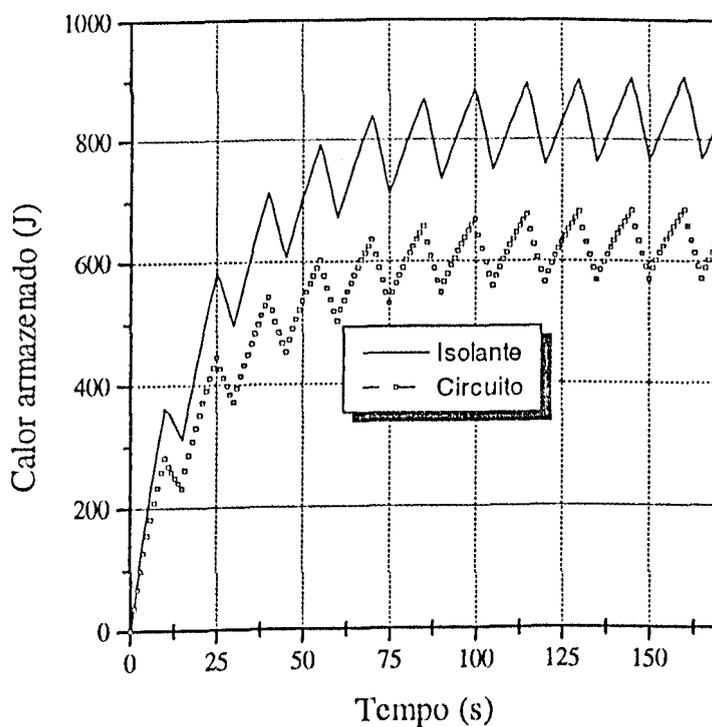


Figura 5.12 - Calor armazenado no isolante e no circuito, para o regime intermitente.

Similarmente ao regime contínuo de geração interna de calor, no isolante é acumulada uma quantidade maior de energia, devido possuir maior massa, do que o circuito, e apresentando uma pulsação em virtude da intermitência da geração interna de calor.

A figura 5.13, mostra a variação da temperatura no ponto crítico ao longo do tempo.

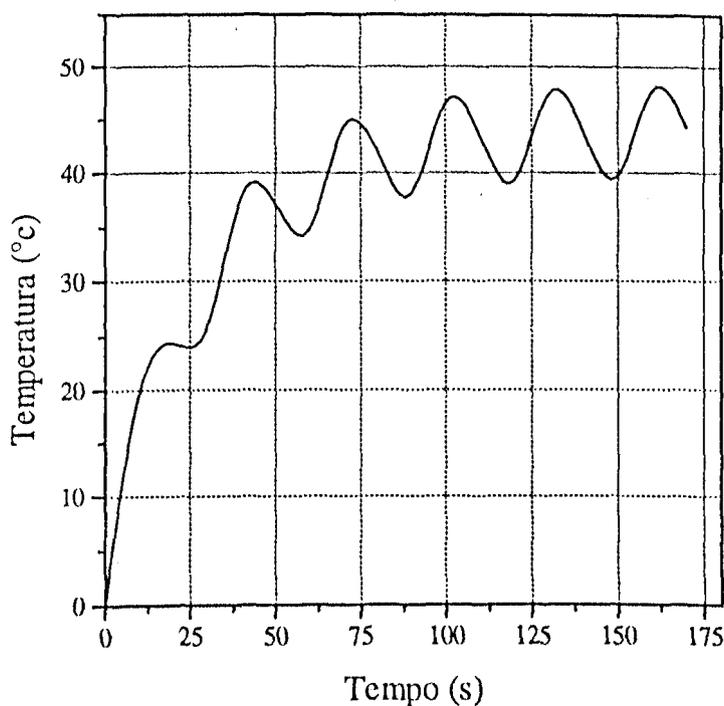


Figura 5.13 - Variação da temperatura no ponto crítico, para o regime intermitente.

Observa-se que a temperatura também aumenta ao longo do tempo conforme apresentado para o regime contínuo, possuindo oscilações devido ao regime intermitente de trabalho, além de atingir gradientes de temperaturas máximos bastante inferiores ao mostrado no regime contínuo. Isto justifica-se pelo fato da quantidade de energia acumulada ao longo do tempo pelo sistema ser menor para o regime intermitente, apesar das

gerações internas de calor serem da mesma amplitude, em ambas as situações

A figura 5.14, ilustra os perfis de temperatura na linha crítica em diferentes instantes de tempo.

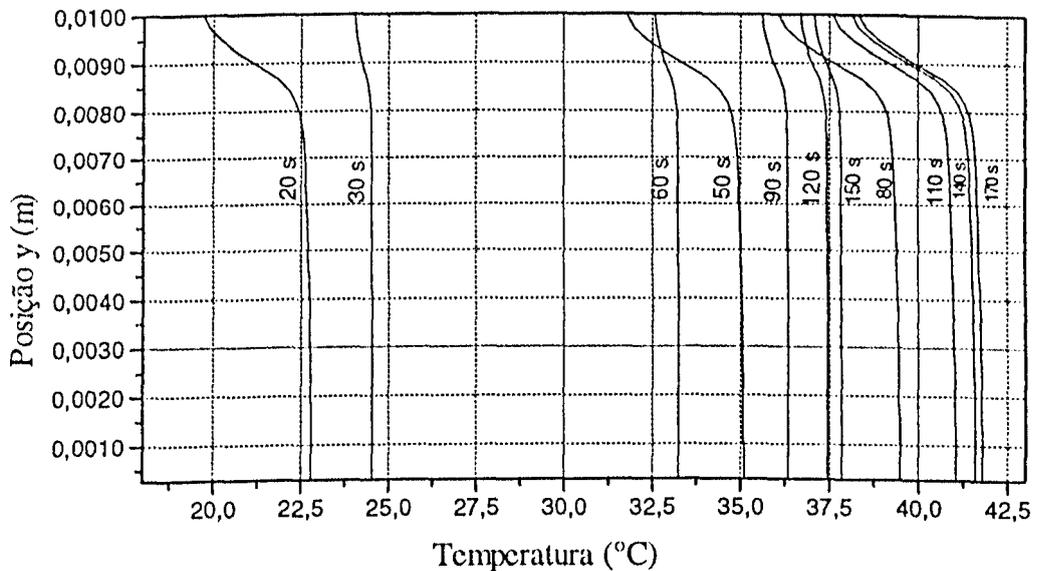


Figura 5.14 - Perfis de temperatura na superfície convectiva, para o regime intermitente.

Observa-se a tendência bidimensional do problema e também verifica-se que o gradiente de temperatura na superfície convectiva oscila diminuindo quando o sistema está desligado e aumentando quando o sistema está ligado.

A figura 5.15, mostra os perfis de temperatura na linha crítica ao longo do tempo. Observa-se que quando o perfil sai da região referente ao circuito, o gradiente de temperatura decresce mais rapidamente com o tempo, apresentando redução no perfil de temperatura quando o sistema está desligado e aumento quando ligado.

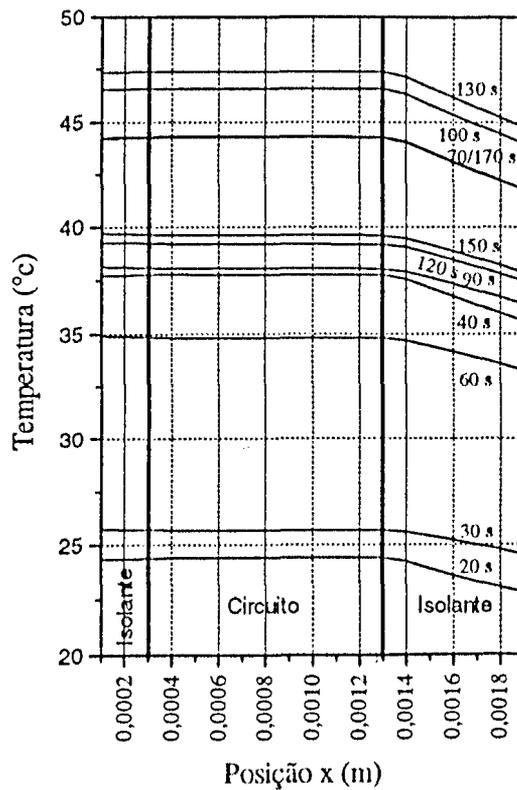


Figura 5.15 - Perfis de temperatura na linha crítica, para o regime intermitente.

## 5.5 - REGIME SENOIDAL DE GERAÇÃO INTERNA DE CALOR, COM DUAS PLACAS PARALELAS DE CIRCUITOS

São apresentados os resultados para a configuração geométrica com dois circuitos paralelos em regime senoidal de geração interna de calor.

A figura 5.16, mostra o balanço de energia, mostrando as curvas de calor de gerado, armazenado e dissipado por convecção.

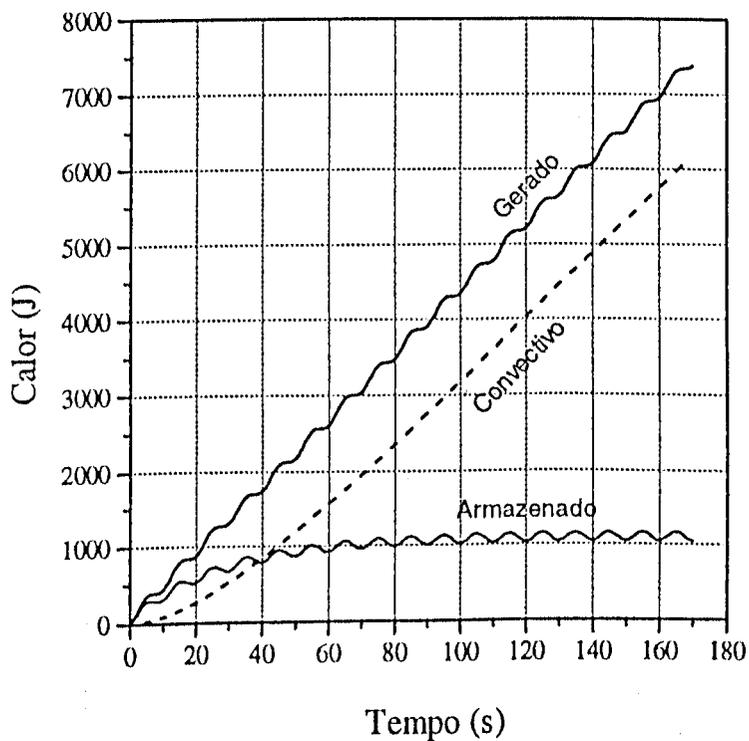


Figura 5.16 - Curvas dos calores envolvidos, para o regime senoidal.

Pode-se verificar na figura 5.17, que as oscilações são da forma senoidal, conforme esperado, devido ao regime ser desta forma, apresentando as mesmas tendências das curvas para regimes contínuo e intermitente.

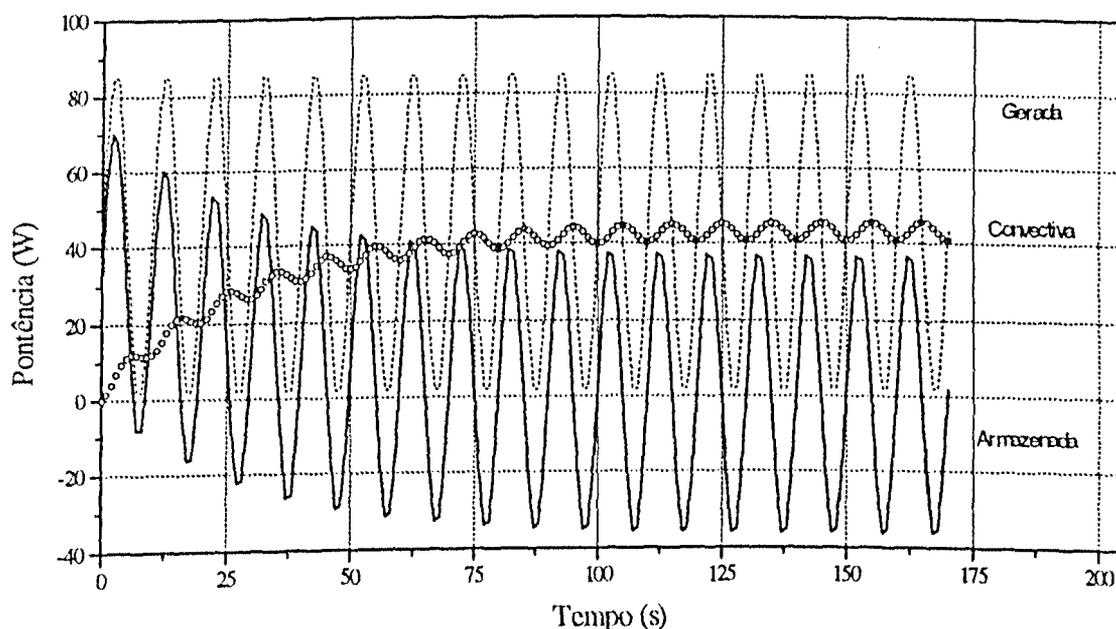


Figura 5.17 - Taxas globais envolvidas, para o regime senoidal.

Verifica-se ainda que, enquanto a taxa de calor armazenada no circuito, oscila com uma amplitude aproximadamente igual a da taxa do calor gerado, a oscilação da taxa de calor perdido por convecção, oscila com amplitude bem menor.

A figura 5.18, mostra as curvas de calor armazenados no

isolante e no circuito.

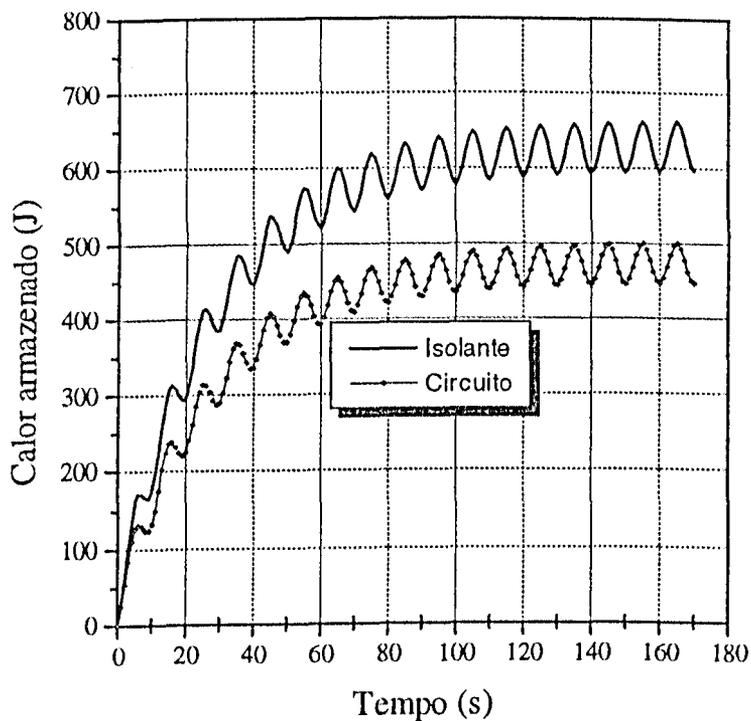


Figura 5.18 - Calor armazenado no isolante e no circuito, para o regime senoidal.

Observa-se que estas curvas possuem o mesmo comportamento das demais curvas para calor armazenado, já apresentadas nos itens anteriores.

A figura 5.19, mostra a variação da temperatura no ponto

crítico, onde pode-se observar que a mesma estabilizou-se em níveis inferiores, aos apresentados nos regimes anteriores. Comparando-a com a figura 5.13, observa-se que não ocorrem oscilações da temperatura ao longo do tempo, devido ter sido utilizado uma frequência alta e o isolante ter funcionado como armazenador térmico de calor sensível. Espera-se que utilizando-se uma frequência menor, ocorra oscilações semelhantes as apresentada na figura 5.13.

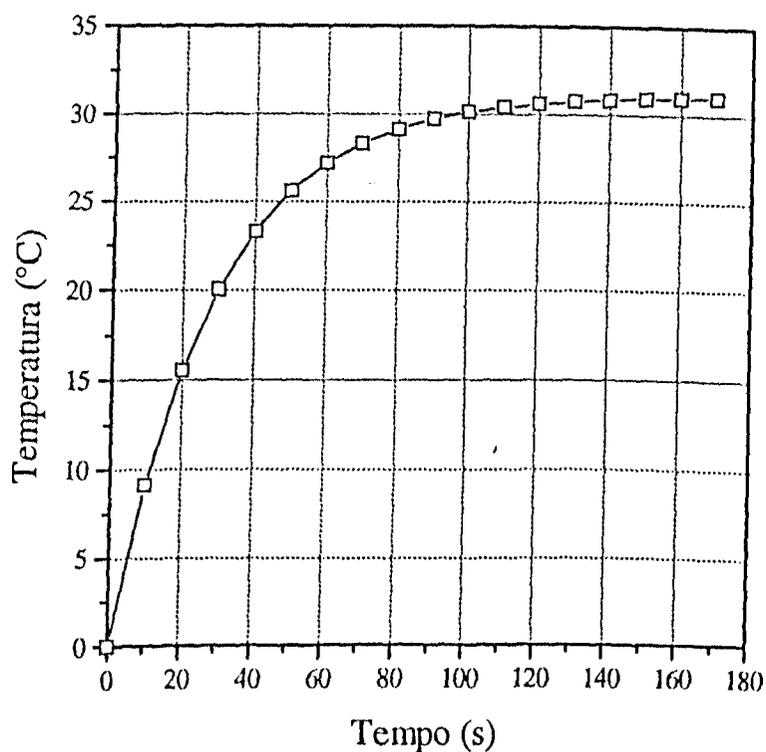


Figura 5.19 - Variação da temperatura no ponto crítico, para o regime senoidal.

A figura 5.20, apresenta o perfil de temperatura na superfície convectiva para alguns instantes de tempo, nos quais observa-se comportamento semelhante ao regime contínuo de geração interna de calor, não verificando-se quedas de temperatura ao longo do tempo, como observado no regime intermitente.

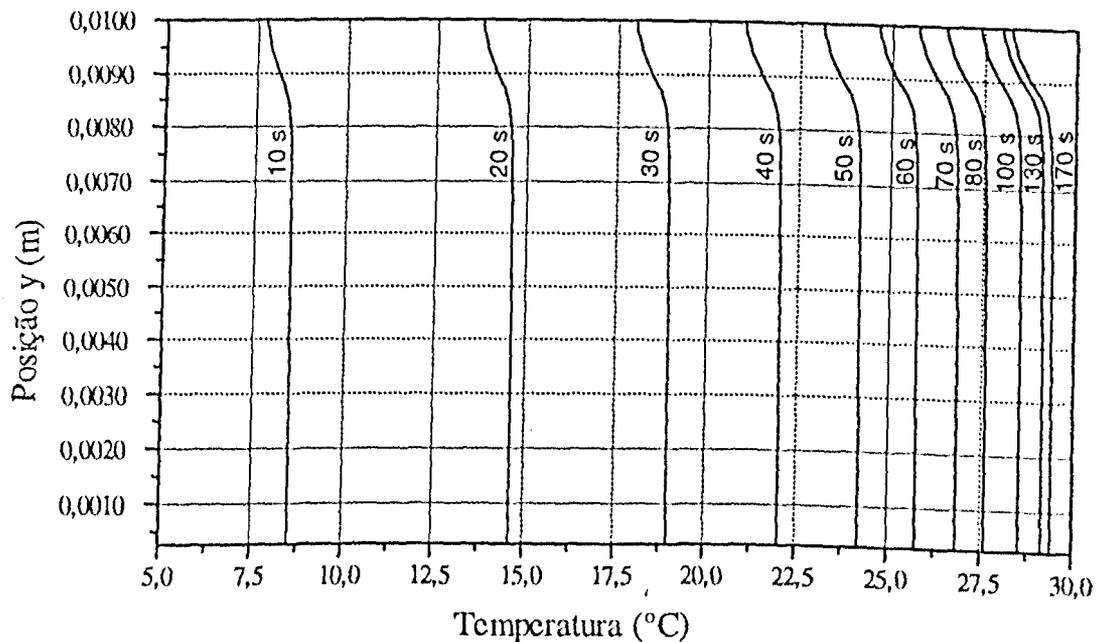


Figura 5.20 - Perfis de temperatura na superfície convectiva, para o regime senoidal.

A figura 5.21, mostra a variação da temperatura na linha crítica ao longo do tempo para instantes de tempo diferentes, onde observa-se

comportamento semelhante ao regime contínuo de geração interna de calor, apresentando-se níveis de temperatura inferior, devido ao calor total gerado pelo sistema ser menor, como pode-se observar nas figuras 5.3 e 5.16.

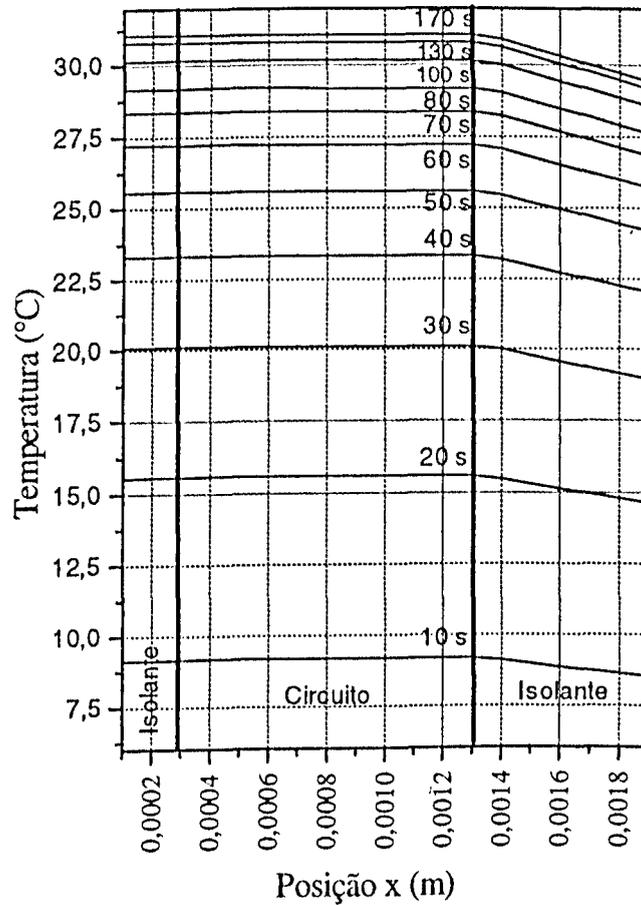


Figura 5.21 - Perfis de temperatura na linha crítica, para o regime senoidal.

## 5.6 - REGIME CONTÍNUO DE GERAÇÃO INTERNA DE CALOR, COM TRÊS PLACAS PARALELAS DE CIRCUITOS

Apresentam-se aqui os resultados para o regime contínuo de geração interna de calor, com três placas paralelas de circuitos, como é mostrado na figura 5.2, onde está representado apenas o primeiro quadrante do componente eletrônico.

A figura 5.22, mostra as curvas de calores envolvidos no sistema. Observa-se que o comportamento delas é semelhante ao comportamento dos demais regimes de trabalho já apresentados.

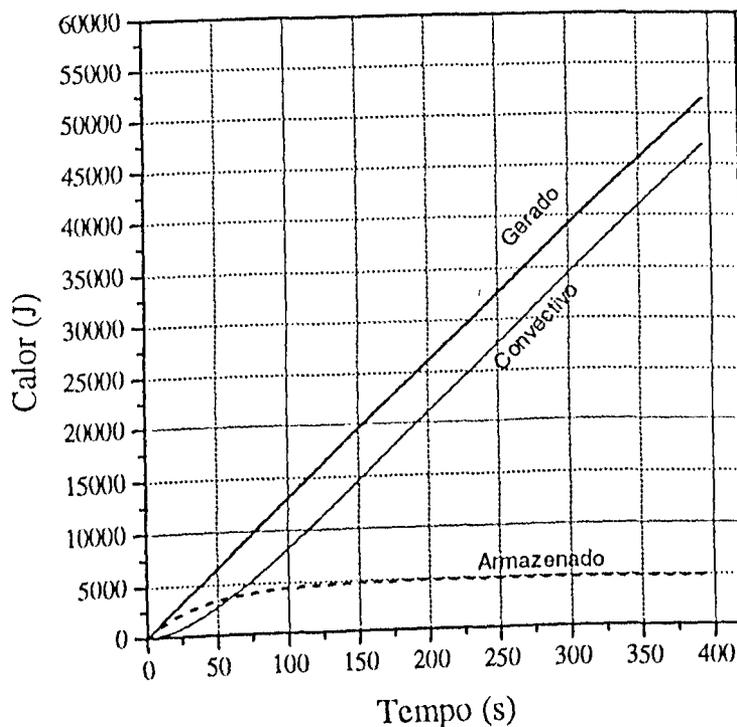


Figura 5.22 - Curvas dos calores envolvidos, para o regime contínuo com três placas de circuitos.

A figura 5.23, mostra as curvas das taxas globais do sistema, onde verifica-se o mesmo comportamento apresentado pelo regime contínuo com dois circuitos. Observa-se que o regime permanente foi atingido em aproximadamente 170 s no sistema com dois circuitos, e em aproximadamente 300 s no sistema com três circuitos.

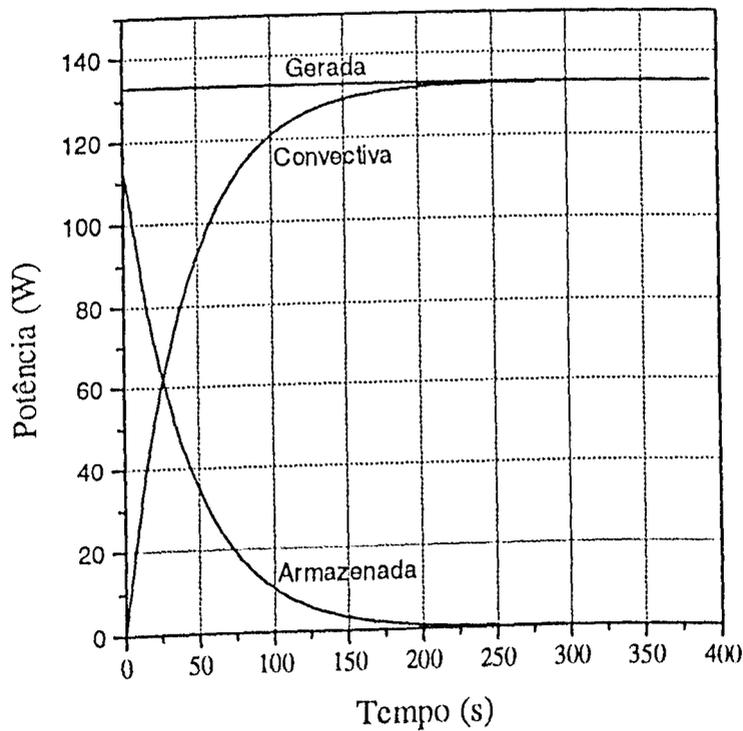


Figura 5.23 - Taxas globais envolvidas, para o regime contínuo com três placas de circuitos.

A figura 5.24, mostra as curvas de calor armazenados no

isolante e no circuito.

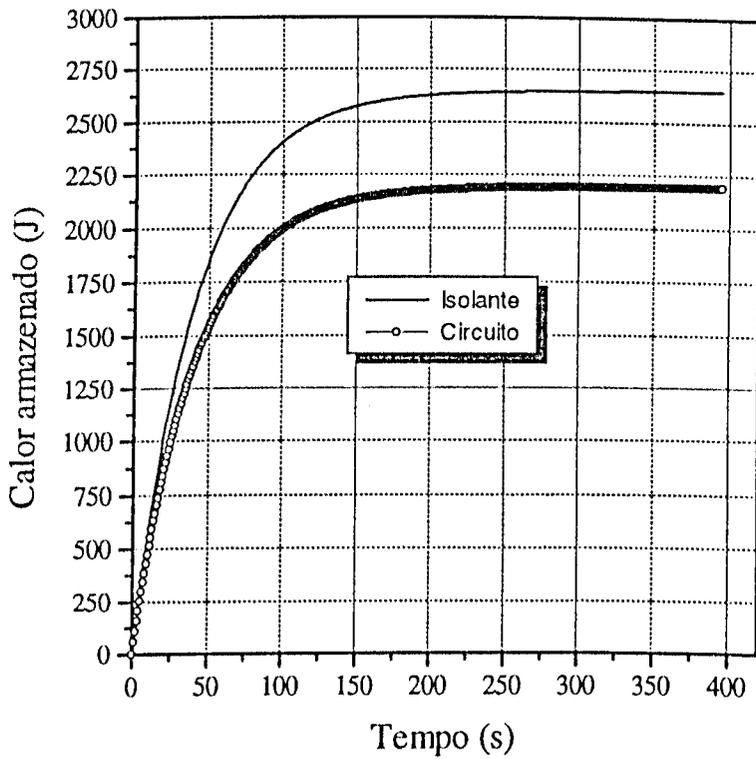


Figura 5.24 - Calor armazenado no isolante e no circuito, para o regime contínuo com três placas de circuitos.

A figura 5.25, mostra a variação da temperatura no ponto crítico ao longo do tempo, observa-se que a temperatura em regime permanente estabiliza-se em  $103^{\circ}\text{C}$ , enquanto que para o sistema com dois circuito a

temperatura estabilizou-se em 66 °C.

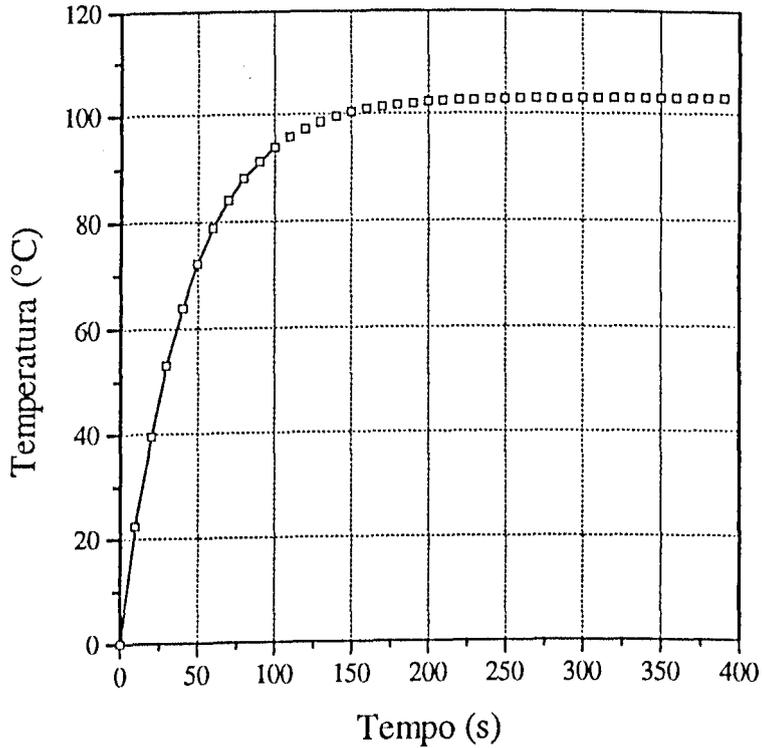


Figura 5.25 - Variação da temperatura no ponto crítico, para o regime contínuo com três placas de circuitos.

A figura 5.26, mostra o perfil de temperatura na superfície convectiva para alguns intervalos de tempo. O comportamento do perfil é semelhante aos demais apresentados anteriormente.

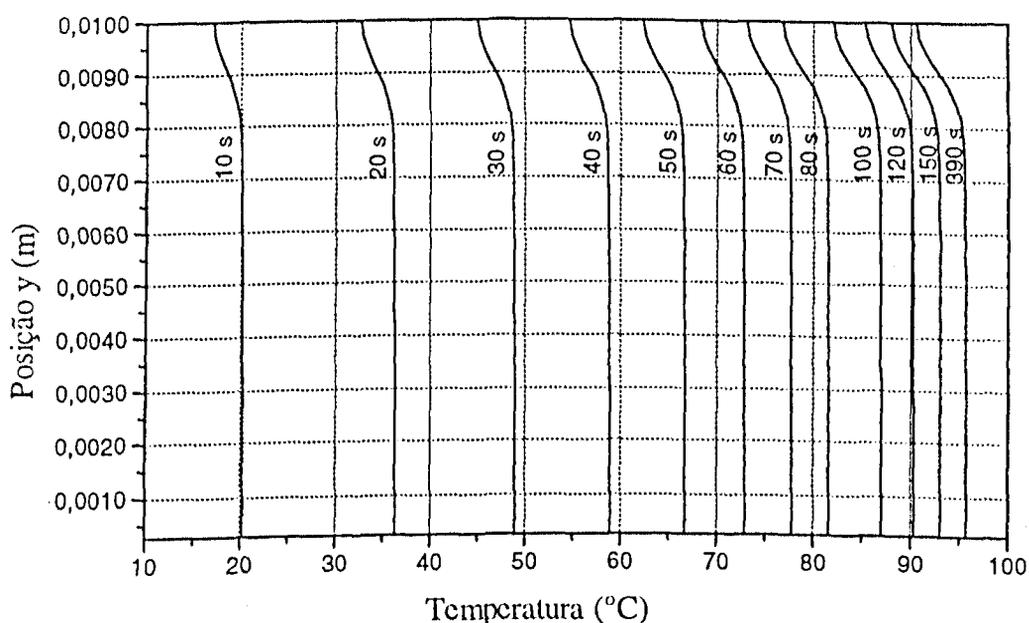


Figura 5.26 - Perfis de temperatura na superfície convectiva, para o regime contínuo com três placas de circuitos.

A figura 5.27, mostra o perfil de temperatura na linha crítica, onde observa-se comportamento semelhante aos demais perfis apresentados. Verifica-se uma variação mínima, mantendo-se quase que constante a temperatura quando o perfil posiciona-se sobre as regiões referentes aos circuitos, sofrendo uma queda de temperatura na região entre os circuitos e tornando-se mais abrupta na região entre o circuito e a superfície convectiva, como esperado.

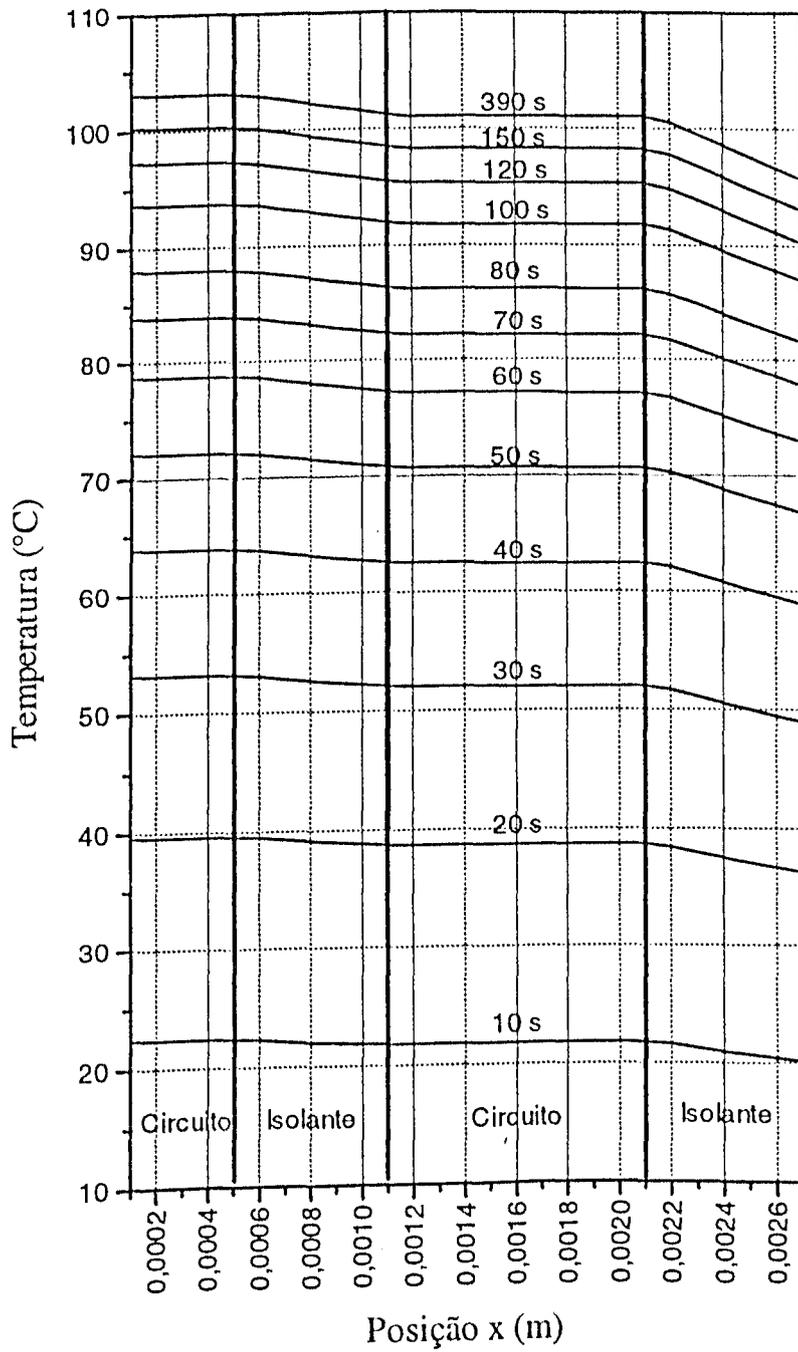


Figura 5.27 - Perfis de temperatura na linha crítica, para o regime contínuo com três placas de circuitos.

## 6 - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

### 6.1 - INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste capítulo resultados, obtidos através da simulação numérica do modelo desenvolvido e tem como objetivo, analisar a influência dos parâmetros de transferência de calor e geométricos para a configuração com duas placas paralelas de circuitos (figura 5.1), em regime contínuo de geração interna de calor.

Para a análise de parâmetros tais como: número de Biot, intensidade da geração interna de calor gerada pelo sistema, temperatura do fluido de resfriamento, espessura do isolante e condutividade térmica do isolante, realizaram ensaios onde procurou-se salientar a influência no comportamento e a importância de cada um desses itens no controle de temperatura em locais críticos do componente eletrônico (figura 5.1). A partir dos resultados, são traçados gráficos que auxiliaram nas interpretações e conclusões.

A tabela 6.1, fornece as propriedades termo-físicas dos materiais utilizados nos ensaios.

Tabela 6.1 - Propriedades termo-físicas utilizadas nos ensaios.

Propriedades termo-físicas a 300K					
	Circuito A	Isolante A	Isolante B	Isolante C	Isolante D
$\rho$	2300	1300	1300	1300	1300
$Cp$	712	1465	1465	1465	1465
$k$	148	1,40	0,43	0,94	1,87

A tabela 6.2, apresenta os parâmetros geométricos das malhas utilizadas.

Tabela 6.2 - Parâmetros geométricos das malhas.

Parâmetros geométricos (m)							
Malha	H	L	A	B	C	D	E
1	0,0100	0,0019	0,0003	0,0010	0,0006	0,0087	0,0013
2	0,0100	0,0022	0,0004	0,0010	0,0008	0,0087	0,0013
3	0,0100	0,0025	0,0005	0,0010	0,0010	0,0087	0,0013
4	0,0100	0,0028	0,0006	0,0010	0,0012	0,0087	0,0013
5	0,0100	0,0037	0,0009	0,0010	0,0018	0,0087	0,0013

As tabelas 6.3a e 6.3b apresentam os ensaios realizados, bem como as condições iniciais de simulação e o objetivo de cada um.

Tabela 6.3a - Ensaios realizados para verificar a influência dos parâmetros de transferência de calor e geométricos.

Ensaio	Dados de Entrada	Objetivo
1	Malha 1. Isolante A. Circuito A. $q''' = 10^7 \left(\frac{W}{m^3}\right)$ . Biot: 0,1 - 0,5 - 1 - 2 - 5. $T_i = T_f = 0^\circ C$ .	Verificar a influência do número de Biot sobre a transferência de calor.
2	Malha 1. Isolante A. Circuito A. $q''' = 5 \times 10^5, 10^6, 5 \times 10^6, 10^7 \left(\frac{W}{m^3}\right)$ Biot: 1,0. $T_i = T_f = 10^\circ C$ .	Verificar a influência da densidade de calor, sobre o campo de temperatura.
3	Malha 1. Isolante A. Circuito A. $q''' = 10^7 \left(\frac{W}{m^3}\right)$ . Biot: 1,0. $T_i = T_f = -10^\circ C, 0^\circ C, 10^\circ C$ .	Verificar a influência da temperatura do fluido de resfriamento sobre o campo de temperatura.
4	Malha 1, 2, 3, 4, 5. Isolante A. Circuito A. $q''' = 10^7 \left(\frac{W}{m^3}\right)$ . Biot: 1,0. $T_i = T_f = 10^\circ C$ .	Verificar a influência da espessura de isolante sobre o campo de temperatura.

Tabela 6.3b - Ensaios realizados para verificar a influência dos parâmetros de transferência de calor e geométricos.

Ensaio	Dados de Entrada	Objetivo
5	Malha 1	Verificar a influência da condutividade térmica sobre a transferência de calor.
	Isolante A, B, C, D.	
	Circuito A.	
	$q''' = 10^7 \left( \frac{W}{m^3} \right)$ .	
	Biot: 1,0.	
	$T_i = T_f = 10^0 C$ .	

## 6.2 - INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE BIOT (ENSAIO 1)

Este ensaio foi realizado com o intuito de avaliar a influência do número de Biot.

A figura 6.1, mostra as curvas de distribuição de temperatura no ponto crítico ao longo do tempo, para diferentes números de Biot. Neste e nos demais ensaios, os níveis de temperaturas apresentados desconsidera o efeito da resistência de contato entre as interfaces isolante/circuito, conforme foi dito no item 1.3.

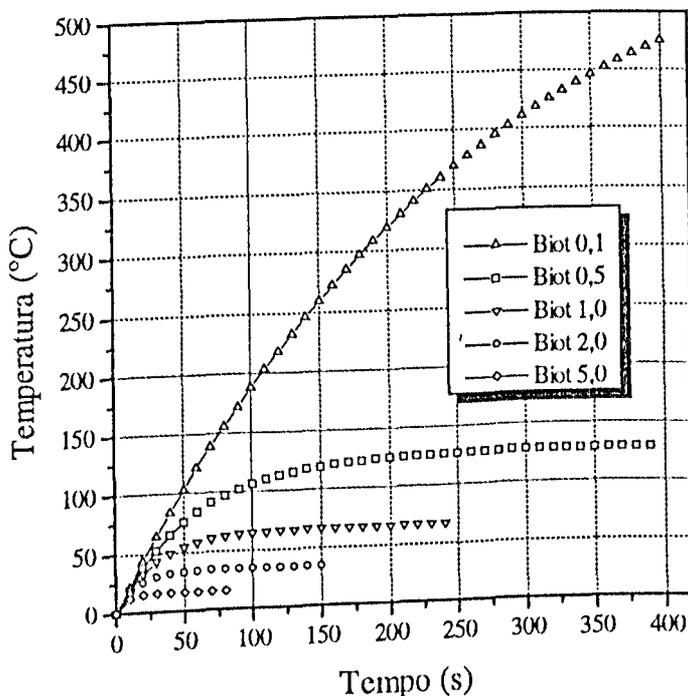


Figura 6.1 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes números de Biot.

No ensaio com número de Biot = 0,1, que corresponde a convecção natural para o ar, verifica-se que o regime permanente não foi alcançado, apresentando temperatura em elevação e superiores a 400°C, que certamente danificaria qualquer componente eletrônico submetido a essas condições, enquanto que para os outros valores de números de Biot, a temperatura crítica se estabiliza em níveis bastantes moderados. Observa-se que Biot = 0,5, correspondendo a convecção forçada para o ar, a temperatura crítica estabiliza-se em 128°C. Para números de Biot superiores a 1, relativas a resfriamento utilizando líquido, as temperaturas alcançada no ponto crítico são inferiores aquelas correspondentes a convecção utilizando o ar. Quanto maior o número de Biot, menor a temperatura no ponto crítico, e também menor o tempo gasto para ocorrer a estabilização, como mostra a figura 6.1.

A figura 6.2, mostra os perfis de temperatura na superfície convectiva, onde pode-se constatar que para maiores números de Biot os níveis de temperaturas nos perfis são menores.

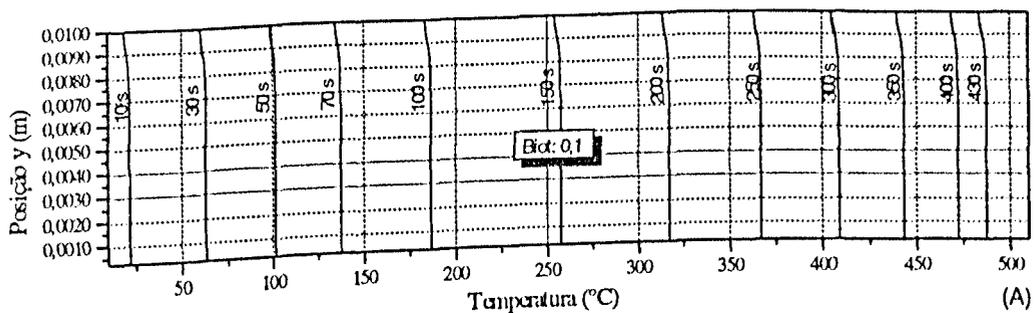


Figura 6.2a - Perfis de temperatura na superfície convectiva, para diferentes números de Biot.

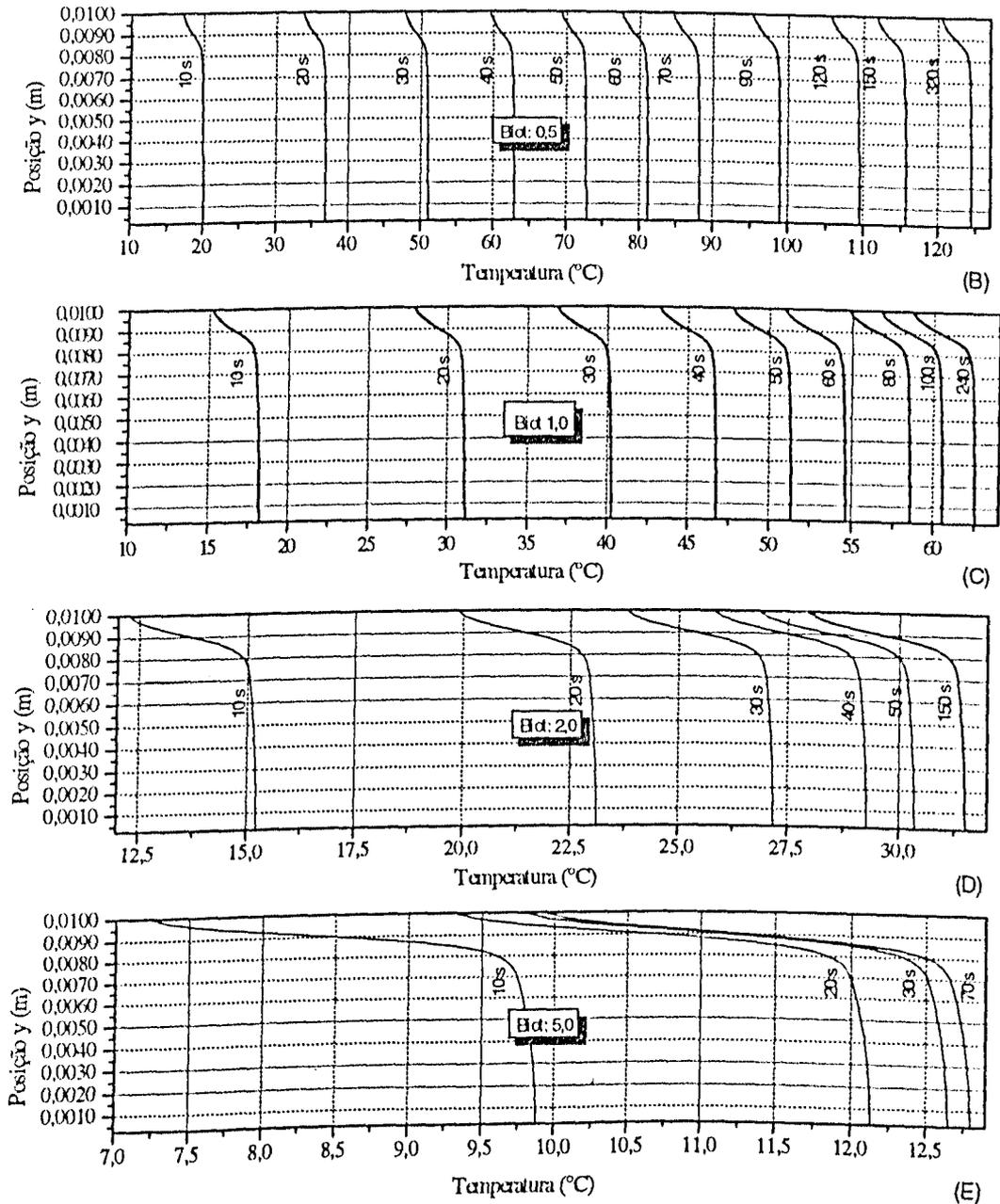


Figura 6.2 - Perfis de temperatura na superfície convectiva, para diferentes números de Biot.

A figura 6.3, mostra os perfis de temperatura na linha crítica para diferentes números de Biot, os quais seguem a mesma tendência dos

perfis na superfície convectiva.

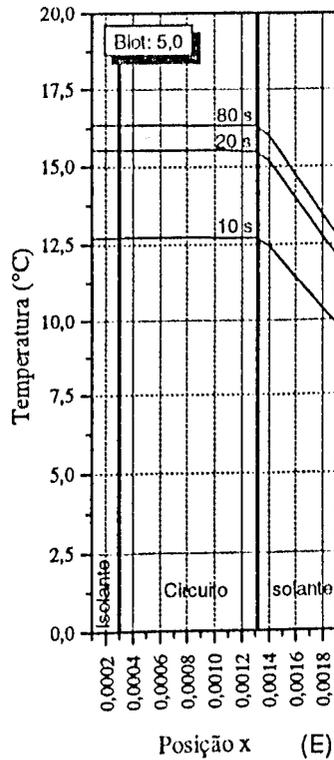
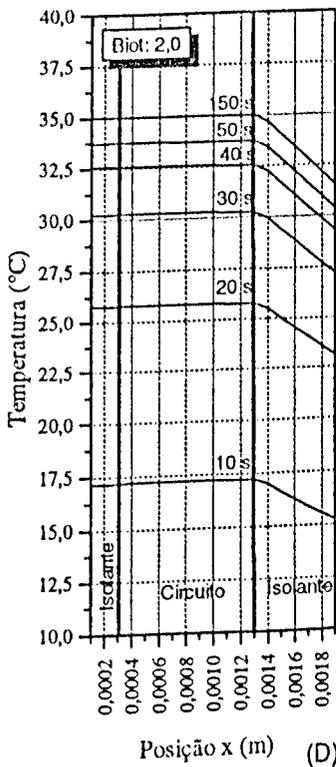
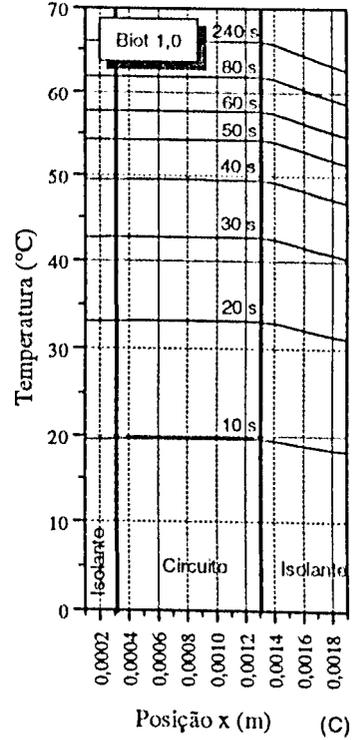
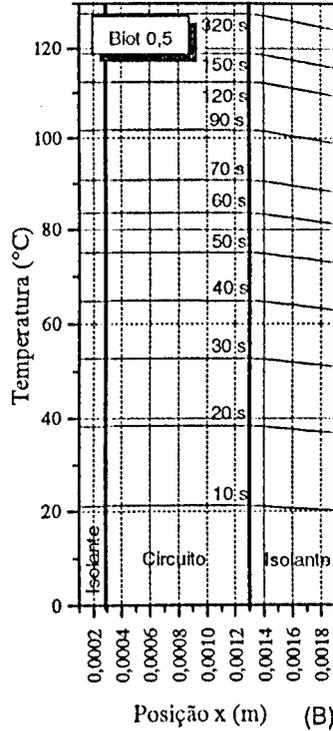
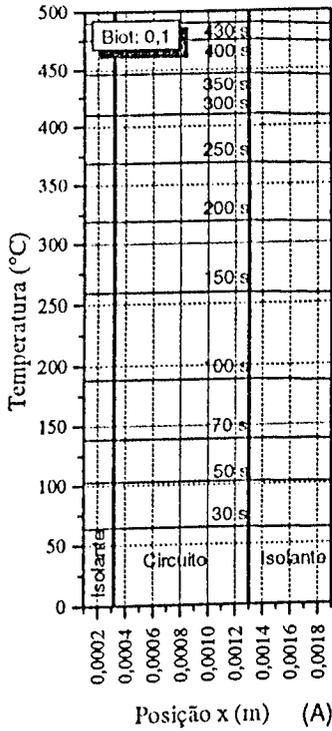


Figura 6.3 - Perfis de temperatura na linha crítica para diferentes números de Biot.

A figura 6.4, mostra o calor armazenado no isolante e no circuito, para diferentes números de Biot.

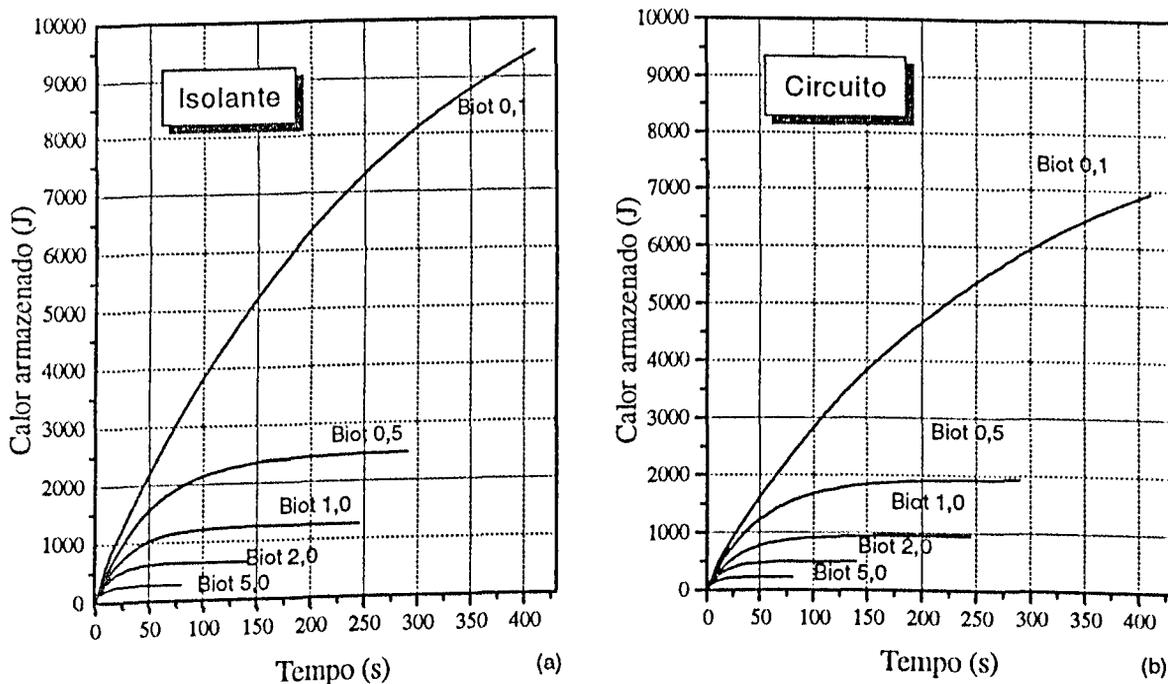


Figura 6.4 - Calores armazenados no isolante e no circuitos para diferentes números de Biot

Como esperado, pode-se verificar que quanto maior for o número de Biot, menor será a quantidade de energia armazenada pelo sistema, devido a temperatura estabilizar-se em níveis mais baixos.

### 6.3 - INFLUÊNCIA DA INTENSIDADE DE GERAÇÃO INTERNA DE CALOR (ENSAIO 2)

Neste ensaio, verifica-se a influência da intensidade de geração interna de calor gerada pelo componente eletrônico.

A figura 6.5, mostra a distribuição de temperatura no ponto crítico, para diferentes intensidades de geração interna de calor.

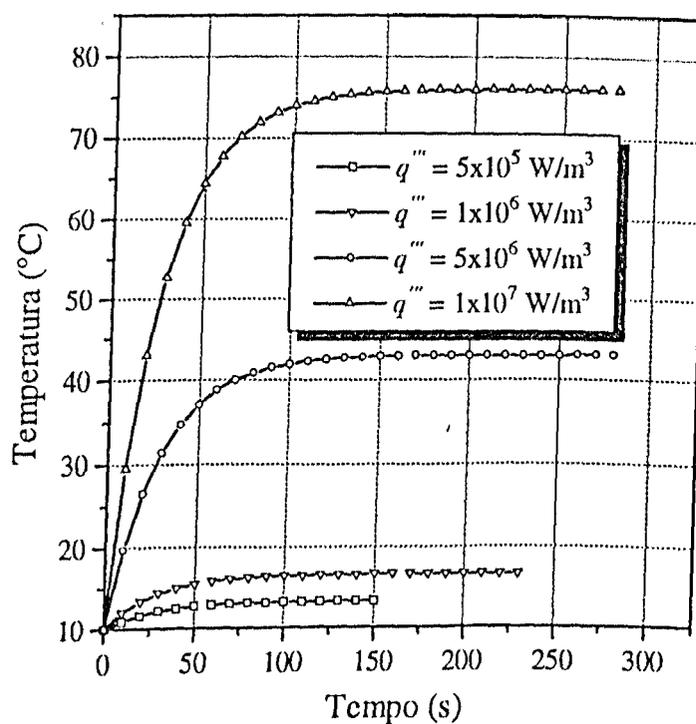


Figura 6.5 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes intensidades de geração interna de calor.

Considerando as condições iniciais de simulação definidas para o ensaio 2, verifica-se que para menores intensidades de geração interna de calor os níveis de temperaturas alcançados são também menores, como esperado. Fazendo-se uma comparação, em termos de temperaturas absolutas, tem-se para geração de  $q''' = 5,0 \times 10^5 \text{ W/m}^3$  uma temperatura estabilizada em 286,3K e para  $q''' = 1,0 \times 10^7 \text{ W/m}^3$  uma temperatura estabilizada em 349K.

A figura 6.6, mostra as curvas de calores armazenados no isolante e no circuito, para diferentes gerações internas de calor.

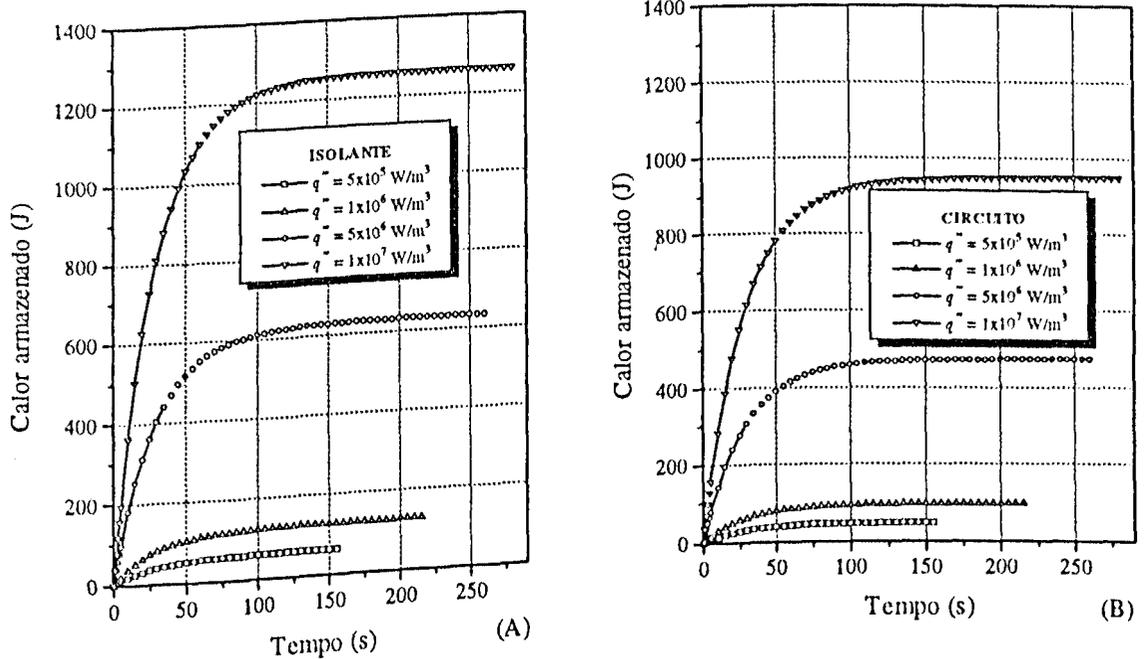


Figura 6.6 - Calores armazenados no isolante e no circuito para diferentes intensidades de geração interna de calor.

## 6.4 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO FLUÍDO DE ARREFECIMENTO (ENSAIO 3)

Este ensaio foi realizado com o intuito de avaliar a influência, da temperatura do fluido de resfriamento sobre o comportamento do campo de temperaturas no dispositivo eletrônico.

A figura 6.7, ilustra as curvas de temperatura no ponto crítico ao longo do tempo.

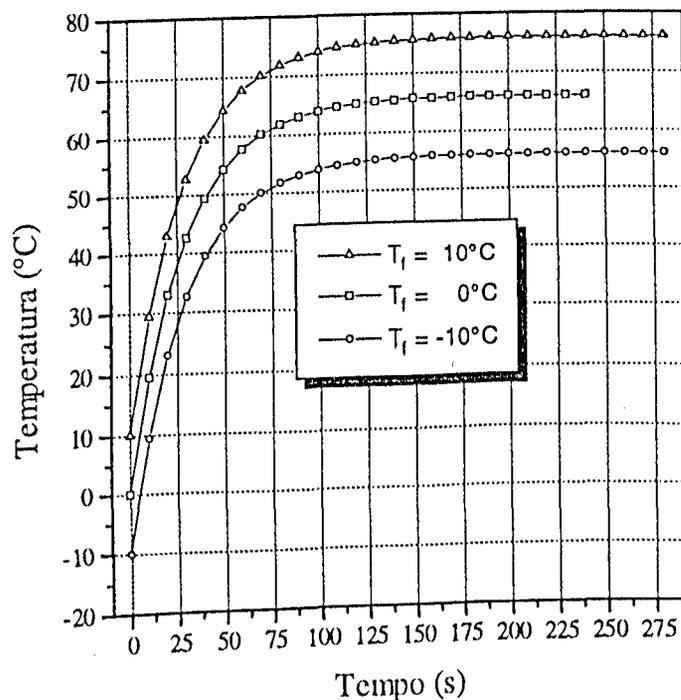


Figura 6.7 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes temperaturas de resfriamento.

Observando-se as três curvas, verifica-se que as temperaturas equilibraram-se praticamente no mesmo instante de tempo, entorno de 200 s. A diferença entre as temperaturas em qualquer instante de tempo, conforme mostrado na figura 6.7, corresponde exatamente a diferença entre as temperaturas do fluido de resfriamento, que é de  $10^{\circ}\text{C}$ .

Portanto, para abaixar a temperatura de um componente eletrônico em um determinado valor, é necessário reduzir a temperatura do fluido de resfriamento no mesmo valor. Ao considerarmos, que a eficiência de um sistema frigorífico, se reduz a medida que o mesmo opera com temperaturas mais baixas, a opção de se abaixar a temperatura do fluido, sem estar acompanhada de um aumento do coeficiente de convecção, não apresenta ser a melhor solução para seu resfriamento, além de consumir mais energia na realização deste trabalho.

A figura 6.8, mostra as curvas de calor armazenado no isolante e no circuito para diferentes temperaturas de resfriamento do fluido de arrefecimento.

Observa-se que a energia acumulada, tanto no isolante como no circuito, é a mesma para as três temperaturas do fluido de resfriamento, isto pode ser facilmente compreendido verificando-se a equação 2.7, que representa a forma na qual é calculado o calor armazenado, onde observa-se que a variação de temperatura é sempre a mesma para qualquer temperatura do fluido de resfriamento.

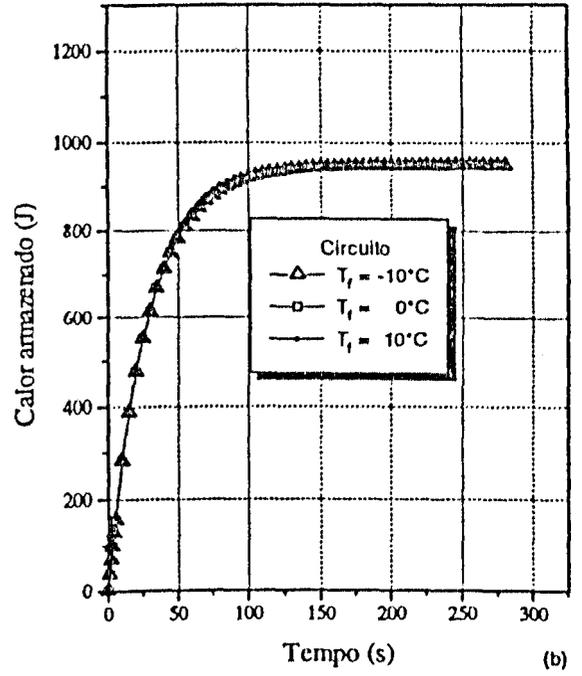
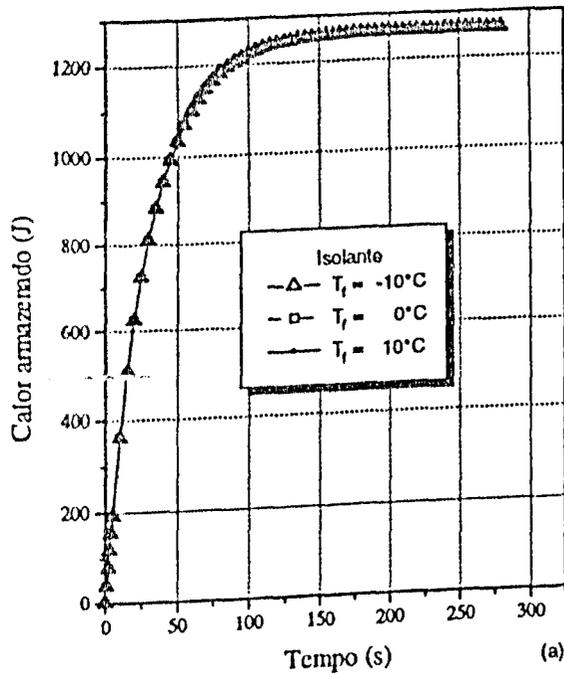


Figura 6.8 - Calores armazenados no isolante e no circuito para diferentes temperaturas do fluido de resfriamento.

## 6.5 - INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DO MATERIAL ISOLANTE (ENSAIO 4)

Neste ensaio verifica-se a influência da espessura do material isolante no controle de temperatura em componentes eletrônicos.

A figura 6.9, mostra a distribuição de temperatura no ponto crítico ao longo do tempo, para diferentes espessuras de isolante.

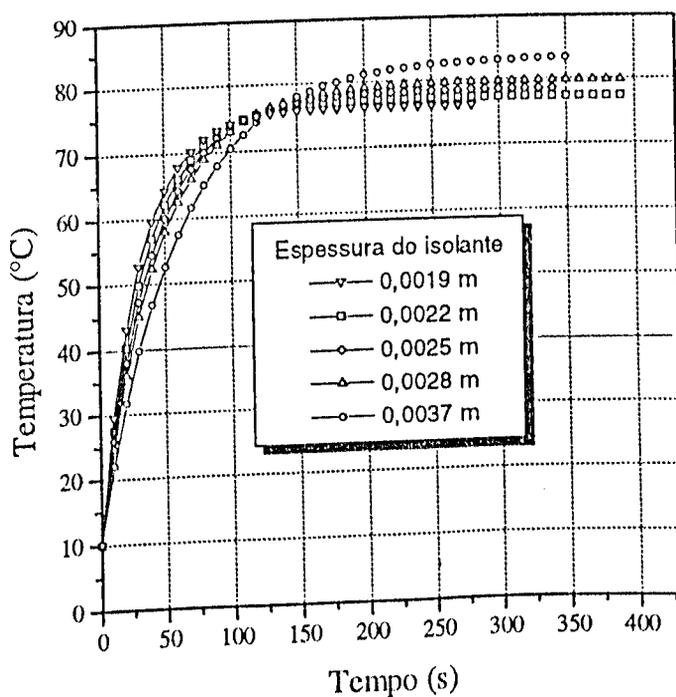


Figura 6.9 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes espessuras de isolante.

Como esperado, quanto maior a espessura do material isolante, maior é a temperatura de estabilização, devido ao aumento da

dificuldade do circuito em dissipar calor, por causa do aumento da resistência térmica encontrada.

No início do ensaio no entanto, a temperatura do ponto crítico cresce mais lentamente com o aumento da espessura do material isolante, só depois dos 120 s aproximadamente, esse comportamento se inverte. Isto é devido ao funcionamento do material isolante antes de estar aquecido, como absorvedor de calor sensível.

A figura 6.10, ilustra as curvas de energia armazenadas no isolante e no circuito para diferentes espessuras do material isolante.

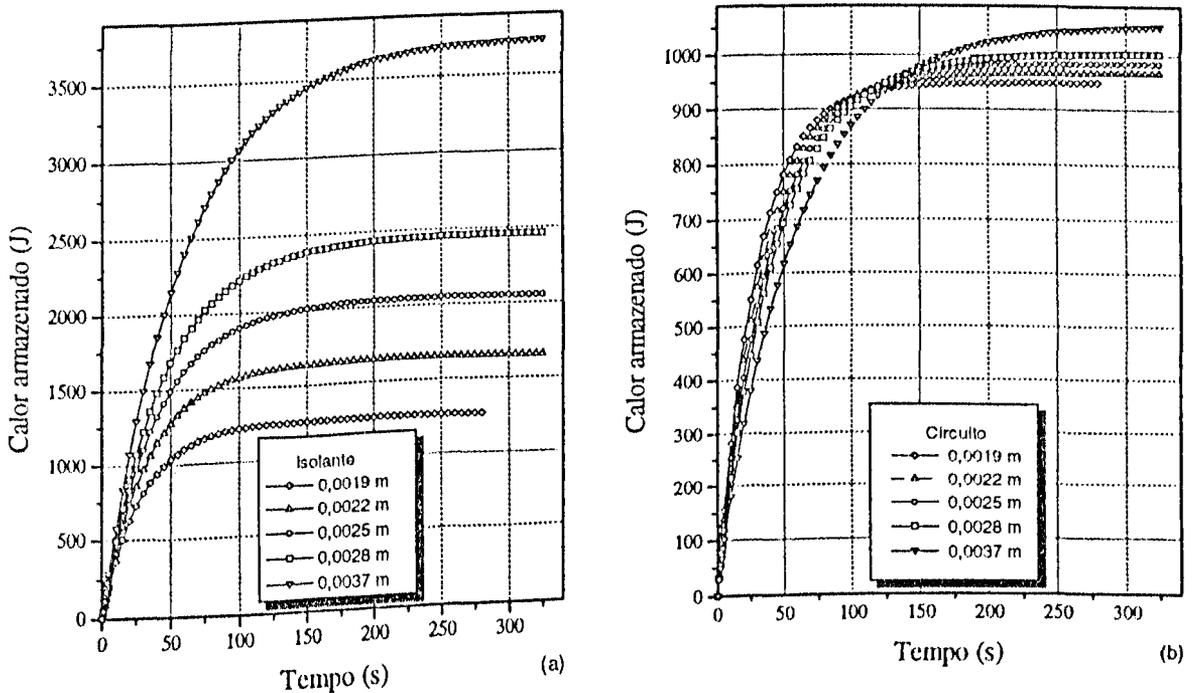


Figura 6.10 - Calores armazenados no isolante e no circuito para diferentes espessuras de isolante.

## 6.6 - INFLUÊNCIA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO MATERIAL ISOLANTE (ENSAIO 5)

Neste ensaio, analisa-se a influência da condutividade térmica do material isolante no processo de controle da temperatura de componentes eletrônicos.

A figura 6.11, ilustra as curvas de distribuição de temperatura no ponto crítico ao longo do tempo para diferentes condutividades térmicas do material isolante.

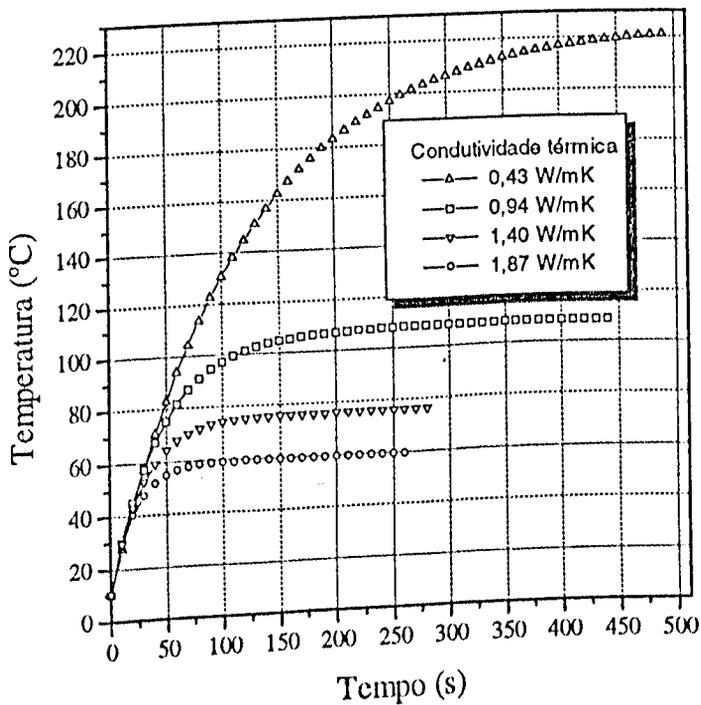


Figura 6.11 - Variação da temperatura no ponto crítico para diferentes condutividades térmicas.

Analisando a figura 6.11, verifica-se que para maiores condutividades térmicas do material isolante as temperaturas equilibram-se em níveis bastantes inferiores, quando comparados com condutividades térmicas baixas, devido a facilidade de dissipação do calor pelo componente eletrônico.

Pôde-se constatar que a utilização de materiais de condutividade térmica maiores, por exemplo ao passar de um material de  $k = 0,94 \text{ W/mK}$  para  $k = 1,40 \text{ W/mK}$ , a temperatura de equilíbrio cai em torno de  $30^\circ\text{C}$ , o que é bastante significativo.

A figura 6.12, mostra as curvas de energias armazenadas no isolante e no circuito, para materiais de condutividades térmicas diferentes.

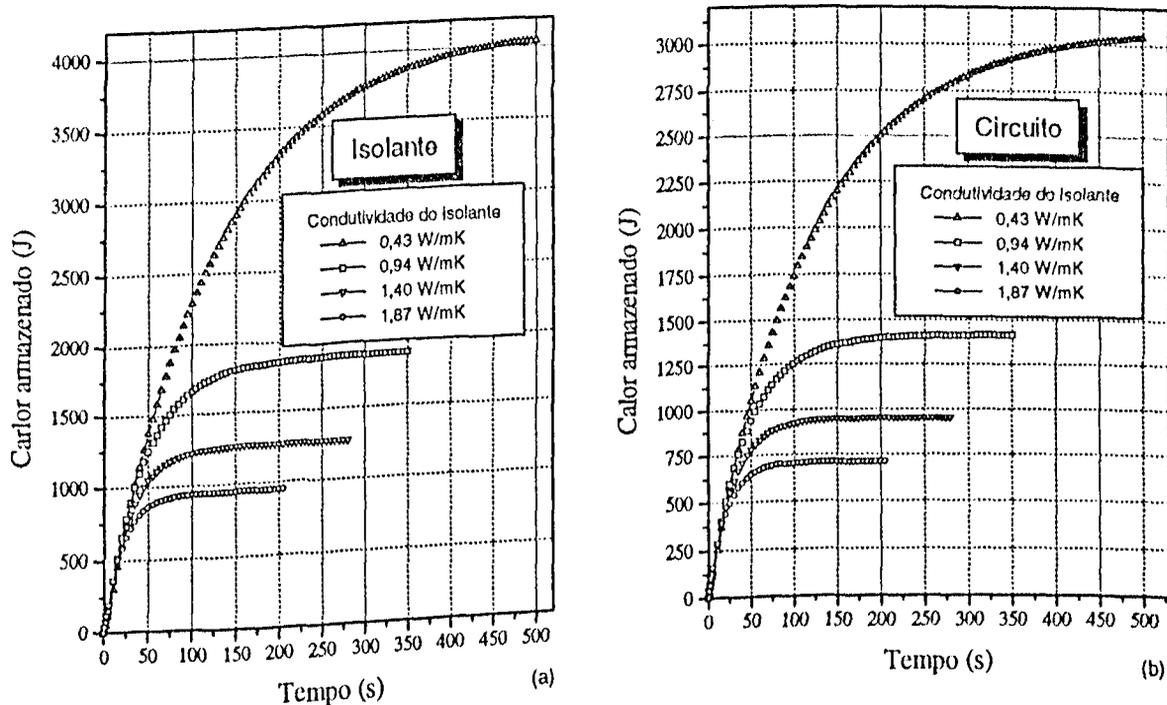


Figura 6.12 - Calores armazenados no isolante e no circuito para materiais de condutividades térmicas diferentes

## 7 - CONCLUSÃO

Tendo em vista os objetivos propostos e considerando os resultados obtidos através do modelo desenvolvido, pode-se concluir que:

- a) O procedimento utilizado no modelo, tratando a variação da condutividade térmica, através de uma *condutividade térmica equivalente*, mostrou-se adequado, já que pode-se considerar que o mesmo apresentou comportamento conveniente para os diferentes valores de condutividade térmica empregados. Acredita-se ainda, que um procedimento semelhante ao aqui empregado, pode ser utilizado também se for desejado incluir os efeitos de uma *resistência térmica de contato*, entre dois diferentes materiais.
- b) A equação da conservação de energia foi resolvida dentro de um domínio que inclui as regiões do circuito e do isolante, no entanto a geração interna ocorre apenas na região do circuito. O modelo resolve isso de maneira consistente e pôde ser adaptado de maneira fácil, para configurações que incluem duas e três regiões de geração de calor.
- c) Os resultados obtidos para os diferentes regimes de geração interna de calor (contínua, intermitente e senoidal), foram satisfatórios e dentro do esperado. A maneira como essa geração interna é tratada no modelo, permite que, conhecendo-se outras funções que descrevam o regime temporal de operação, esse pode ser incluído de maneira bastante simples no modelo. Também pode ser incluído, se conhecido, a distribuição

geométrica das condições de contorno por convecção, relativas ao resfriamento do componente eletrônico.

- d) Pelo fato da geometria considerada ser bastante simplificada, o que permitiu uma discretização no domínio em volumes de controles também muito simples, acredita-se que o modelo possa ser melhorado em termos de processamento computacional do mesmo, através de uma análise mais apurada da relação entre o tamanho da malha e o incremento de tempo.
- e) As temperaturas encontradas para as regiões críticas como apresentadas, atingiram valores abaixo daqueles encontrados na literatura para trabalhos experimentais em regimes de operação semelhantes. Isto é devido ao fato que nesses estudos estão presentes outras formas de resistências térmicas, além das aqui consideradas, principalmente as resistências térmicas de contato entre materiais diferentes.
- f) Apesar do que foi mencionado acima, a análise realizada utilizando o modelo desenvolvido, para se verificar a influência dos diversos parâmetros geométricos e de transferência de calor no processo de arrefecimento, permitiu analisar, pelo menos de maneira qualitativa essas influências, visto que, tanto a geometria, como as condições de contorno aqui estudadas são bastantes simplificadas, quanto comparadas com dispositivos eletrônicos reais.

Como proposta para novos trabalhos, visando aprimorar o modelo, poderia ser incluída, na resistência térmica equivalente, *uma resistência térmica de contato*, para estudar o seu efeito.

Outro estudo a ser feito, seria analisar de maneira acoplada

incluindo no modelo uma distribuição dos coeficientes de convecção e do campo de temperatura do fluido refrigerante, de maneira diferente do que aqui foi feito assumindo valores constantes para as condições do fluido de resfriamento, e a partir daí avaliar o comportamento térmico do dispositivo eletrônico.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - ALVES, C.L.F.; REGO, O.A.A. & TORO, P.G.P.; "Estabilização de temperatura de Dispositivos Eletrônicos através de uso de Calor Latente"; *Anais do II Congresso Latino-Americano de Transferência de Calor e Matéria*; Volume 1; pp. 220-231; São Paulo-SP; Brasil; 1986.
- [2] - BAR-COHEN, AVRAM; "Thermal Engineering of Electronic Systems"; *USA/Brazil Joint Workshop on Thermal Science Research, Brazil*; December, 1994.
- [3] - BISKEBORN, R. G.; HORVATH, J. L.; AND HULTMARK, E. B.; "Integral Cap Heat Sink Assembly for The IBM 4381 Processor"; *Proceedings Fourth Annual International Electronics Packaging Conference*; pp. 468-474; 1984.
- [4] - CHU, R. C.; HWANG, U. P.; AND SIMONS, R. E.; "Conduction Cooling for an LSI Package: A One-Dimensional Approach"; *IBM Journal of Research and Development*; Vol. 29, pp. 45-54, January 1982.
- [5] - DANIELSON, R. D.; KRAJEWSKI, N.; BROST, J.; "Cooling of a Super-fast Computer"; *Electronic Packaging and Production*; pp. 44-45; July 1986.
- [6] - FERREIRA A.C.; REGO, O.A.A. & LIMA L.C.; "Contribuição ao Estudo da Utilização de Materiais de Mudança de Fase em Sistemas de

- Arrefecimento de Componentes Eletrônicos"; *Anais do XII COBEM*; pp. 645-648; Brasília-DF.; Brasil, 1993.
- [7] - FERREIRA, A. C.; Contribuição ao Estudo da Utilização de Materiais de Mudança de Fase em Sistemas de Arrefecimento de Componentes Eletrônicos; *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia*; Uberlândia-MG; Brasil; 1993; 95p.
- [8] - HANNEMANN, ROBERT J.; BAR-COHEN, AVRAM; "High Heat from A Small Package"; *Mechanical Engineering*; pp. 36-42, March 1986.
- [9] - INCROPERA, F.P.; "Convection Heat Transfer in Electronic Equipment Cooling"; *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 110; pp. 1097-1111; november 1988.
- [10] - KISHIMOTO, T.; OSAKI, T.; "VLSI Packaging Tecnique Using Liquid-Cooled Channels"; *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. CHMT-9; pp. 328-335; 1986.
- [11] - MALISKA, CLOVIS R.; Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional, Fundamentos e Coordenadas Generalizadas; LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.; 1995.
- [12] - NASCIMENTO, D.; REGO, O.A.A.; "Comportamento Intermitente de Componente Eletrônico Refrigerados por Material de Mudança de Fase"; *Anais do Congresso de Engenharia Macânica - Norte/Nordeste*; Volume 2, pp. 1059-1064; Recife-PE; 1996.
- [13] - OKUTANI, K.; OTSUKA, K.; SAHRA, K.; AND SATOH, K.; "Packaging Design of a Sic Ceramic Multi-Chip RAM module"; *Proceedings Fourth*

- Anual International Electronics Packaging Conference*; pp. 299-304; 1984.
- [14] - PATANKAR, SUHAS. V.; Numerical Heat Transfer and Fluid Flow; McGraw-Hill; Hemisphere Publishing Corporation; 1980.
- [15] - SIMONS, R. E.; "The Evolution of IBM high performance Cooling Tecnology"; *IEEE Transaction on Components, Packaging, and Manufacturing Tecnology*, Part A, Vol. 18, No. 4; December 1995.
- [16] - ULRICH, RICHARD K.; RAJAN, SANJAY; "Substrate Temperatures of Liquid Nitrogen Cooled Multichip Modules Utilizing Wirebonded Die"; *IEEE Transaction on Components, Packaging, and Manufacturing Tecnology*, Part A, Vol. 18, No. 4; December 1995.
- [17] - YAMAMOTO, H.; UDAGAWA, Y.; SUZUKI, M.; "Cooling System for FACOM M-780 Large Scale Computer"; *Proceedings of The International Symposium on Cooling for Electronic Equipment*; Honolulu, HI; pp.96-109; 1987.