

ALGORITMO DE ANÁLISE TÉRMICA E DE PERDAS DE DISPOSITIVOS SEMICONDUTORES APLICADO A UM SIMULADOR DE CIRCUITOS ELÉTRICOS

Rodrigo P. Krug

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria
rodrigopkrug@gmail.com

Fabrizio E. Cazakevicius

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria
fabriziocazakevicius@gmail.com

Henrique H. Figueira

Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria
hhfigueira@gmail.com

Rafael C. Beltrame

Professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria
rafaelrcb@gmail.com

Hélio L. Hey

Professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria
heliohey@gmail.com

Resumo. *Este artigo tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta educacional que possa estimar as perdas e o comportamento dinâmico da temperatura de junção de dispositivos semicondutores. Deve ser observado que a temperatura é umas das variantes mais importantes no projeto de conversores visto que afetam sua eficiência e densidade de potência. Através do uso desse algoritmo, o projeto de dissipadores de potência pode ser otimizado acarretando em uma maior densidade de potência, fator altamente desejado pela indústria. Além disso a metodologia proposta é de simples implementação em softwares de simulação de circuitos se comparada a outros métodos como o de elementos finitos.*

Palavras-chave: *perdas. temperatura de junção. ferramenta educacional.*

1. INTRODUÇÃO

O uso de softwares SPICE com o intuito de serem utilizados para simulação de conversores estático comprova-se ser usual.

Por outro lado observa-se uma falta de integração na análise térmica e elétrica de dispositivos semicondutores.

Além disso ferramentas de análise exclusivamente térmica de semicondutores requerem grande esforço computacional, o que vai de encontro a métodos de ensino em Eletrônica de Potência visto sua dificuldade de implementação.

Dessa forma, com uma abordagem de maior simplicidade, U. Drofenik et al. (2005) propuseram um método para estimar a temperatura transiente e em regime de componentes semicondutores. Entretanto tal método não obtivera validação experimental além de não ser voltado para um âmbito educacional.

Sendo assim, o objetivo desse artigo é propor uma ferramenta que seja capaz de estimar o comportamento dinâmico da temperatura de junção de semicondutores aliando esse processo a um método de menor esforço computacional.

2. ANÁLISE DE PERDAS

Genericamente pode-se considerar que semicondutores possuem perdas de comutação e condução.

A primeira refere-se as perdas de entrada em condução (*turn-on*) ou saída de condução (*turn-off*). Nesses instantes

constatam-se sobreposição de tensão e corrente na chave semicondutora havendo por consequência dissipação de energia.

Por outro as perdas em condução são causadas pelo fluxo de corrente no semicondutor.

3. MODELO DO DISPOSITIVO

Nessa etapa os métodos para modelagem térmica e de perdas são analisados.

3.1 Modelagem de perdas

As perdas em condução de um semicondutores, para uma dada temperatura, é estimada com base nas curvas de corrente *versus* tensão fornecidas pelo fabricante. Através desses dados realiza-se a multiplicação dos eixos resultando em curvas de corrente *versus* potência.

Similarmente, as curvas de energia de comutação dissipada também são estimadas. Esse valor de energia para dado nível de corrente e temperatura é dividido pelo passo de simulação com o intuito de obter as perdas de comutação em um único passo de simulação. Ressalta-se que caso o fabricante não disponibilize tais curvas, um *set-up* de análise de perdas para diferentes condições de operação deve ser utilizado.

Logo para a análise de perdas de condução observa-se que os dados podem ser aproximados por um polinômio de terceiro grau. Equação (1) e (2) apresentam essa análise para dois níveis de temperatura.

$$P_{COND25}(i_s) = a_1 \cdot i_s^3 + b_1 \cdot i_s^2 + c_1 \cdot i_s + d_1 \quad (1)$$

$$P_{COND125}(i_s) = a_2 \cdot i_s^3 + b_2 \cdot i_s^2 + c_2 \cdot i_s + d_2 \quad (2)$$

Com o objetivo de obter a potência para dada temperatura, é utilizada a uma interpolação linear como é observado nas Eq(3-5).

$$P_{COND}(I_s, T) = a \cdot T + b \quad (3)$$

Onde:

$$a = \frac{(P_{COND25} - P_{COND125})}{(T_2 - T_1)} \quad (4)$$

$$b = P_{COND25} - a \cdot T_1 \quad (5)$$

3.2 Modelagem térmica

A modelagem térmica tem como finalidade reproduzir o comportamento da temperatura do dispositivo em análise.

Alguns modelos requerem grande esforço computacional o que dificulta sua aplicação em ambientes escolares.

Dessa forma K. Pandya et al. (2005) realizam essa análise de uma forma análoga a circuitos elétricos. Além de serem de maior facilidade de simulação ambas abordagens propostas possuem grande precisão e baixo esforço computacional se comparadas a outros métodos.

Como alguns fabricantes já oferecem o modelo térmico do dispositivo em questão deve-se primeiramente verificar se há tal disponibilidade na folha de dados (*datasheet*) do componente. Caso contrário K. Pandya et al. (2002) propõem formas de obtenção de tais modelos.

Como a obtenção do modelo térmico não faz parte do escopo do artigo será utilizado para validação experimental o CoolMOS SPP17N80C3 o qual possui em seu *datasheet* um modelo térmico de sexta ordem.

Através da obtenção da equação de espaço de estados do modelo dado observa-se que a equação que descreve o modelo é expressa em (6).

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{AT} + \mathbf{Bu} \quad (6)$$

(2) Onde:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_1 C_1} & \frac{-1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{R_1 C_2} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \cdot \frac{1}{C_2} & \frac{1}{R_2 C_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2 C_3} & -\left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) \cdot \frac{1}{C_3} & \frac{1}{R_3 C_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3 C_4} & -\left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}\right) \cdot \frac{1}{C_4} & \frac{1}{R_4 C_4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_4 C_5} & -\left(\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}\right) \cdot \frac{1}{C_5} & \frac{1}{R_5 C_5} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_5 C_6} & -\left(\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6 + R_7}\right) \cdot \frac{1}{C_6} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & (R_6 + R_7).C_6 \end{bmatrix}$$

Por fim a discretização da equação diferencial é dada pelo método de Euler, onde $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

$$T(k+1) = A_d T(k) + B_d U(k) \quad (7)$$

Onde:

$A_d = AT_s + I_{4 \times 4}$, $B_d = BT_s$ e T_s é o passo da simulação.

4. ALGORITMO PROPOSTO

Para o início do funcionamento do algoritmo, alguns dados de entrada são necessários como a temperatura ambiente, os coeficientes dos polinômios e as constantes térmicas como visto na Fig. 1.

Como o sinal de comando (*gate*) e o nível de corrente que passa pelo condutor é atualizado a cada iteração, é possível verificar se o semicondutor está em condução ou em uma comutação.

As perdas de condução e comutação $P_{loss}[k]$ são estimadas por meio do nível de corrente $i_s[k]$ em dado tempo e a temperatura de junção do dispositivo $T_j[k]$. Além disso, como dito previamente a energia dissipada nas comutações, obtida pelas curvas de energia de comutação, é dividida pelo passo de simulação representando a potência instantânea dissipada pelo componente durante o chaveamento. Observa-se que caso o semicondutor esteja bloqueado $P_{loss}[k]$ recebe zero.

As temperaturas do vetor T indicam a temperatura de cada nó no modelo dado pelo fabricante. O primeiro elemento deve ser entendido como temperatura de junção.

A potência dissipada pelo dispositivo e sua temperatura de junção são exportadas para serem plotadas. Por fim após a

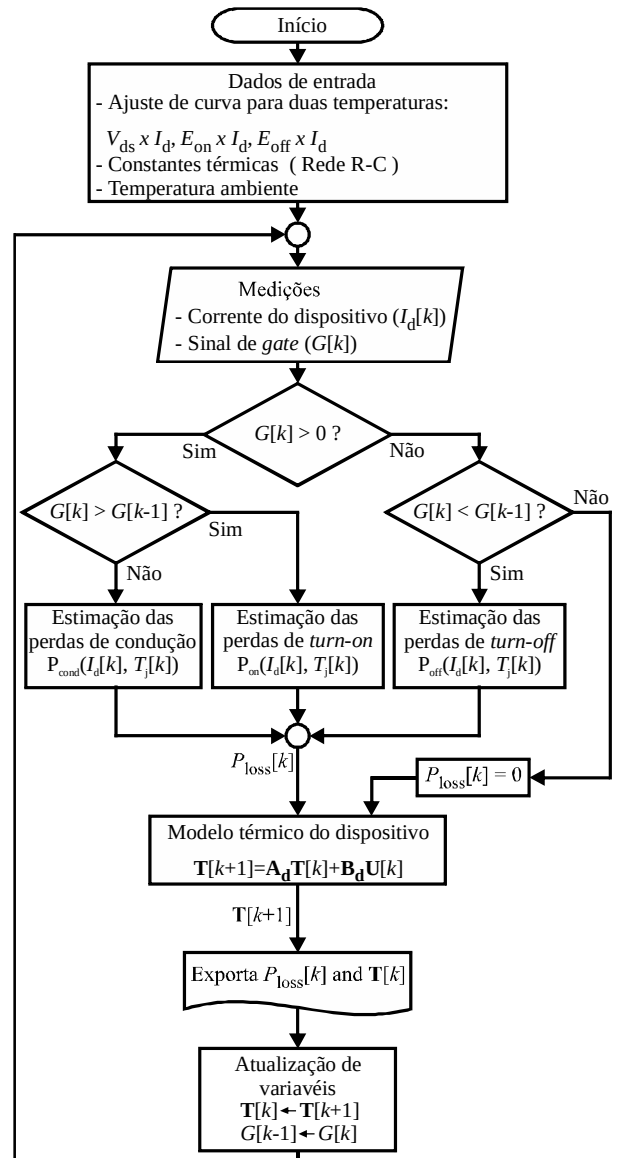


Fig. 1 - Fluxograma do algoritmo proposto

atualização das variáveis, o algoritmo retorna a ler $i_s[k]$ e $g[k]$.

5. RESULTADOS OBTIDOS

O algoritmo proposto foi implementado em uma DLL no software PSIM[®] e usado para estimar as perdas de um conversor *Buck* (Fig. 2). O conversor foi projetado para uma potência de saída $P_o = 250$ W, com tensão de entrada $V_{in} = 100$, tensão de saída $V_o = 50$ V operando com uma frequência de chaveamento $f_s = 10$ kHz. O filtro de saída de segunda ordem do conversor é composto por um capacitor $C = 220$ uF e um indutor $L = 1,56$ mH.

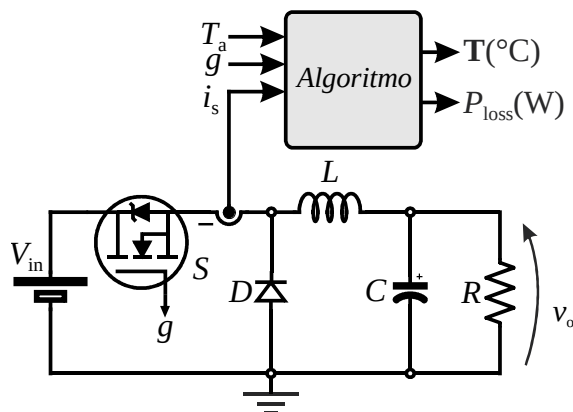


Fig. 2 - Esquemático de simulação

Os dados do modelo térmico são providos pelo fabricante e podem ser obtidos em seu *datasheet*.

Adicionalmente, a Fig. 3 (a) mostra o comportamento dos estados T_j (temperatura de junção) e T_6 (temperatura do encapsulamento). Como pode ser visto, a temperatura é uma função de P_{loss} (Fig. 3 (b)).

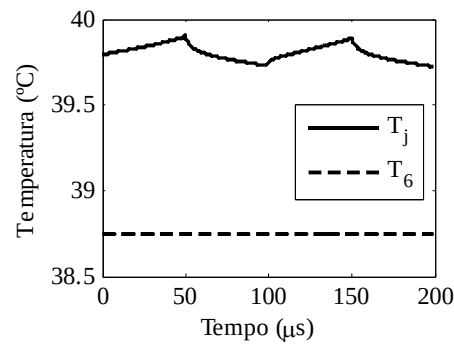
Afim de validar experimentalmente a metodologia, o conversor *Buck* foi implementado. Através da câmera térmica Fluke Ti20[®] foi mensurada a temperatura de regime do encapsulamento do semiconductor em análise. Observa-se que a temperatura medida ($T_6 = 39,70^\circ\text{C}$) corrobora o resultado de simulação ($T_6 = 38,74^\circ\text{C}$) como salienta a Fig. 4.

6. REFERÊNCIAS

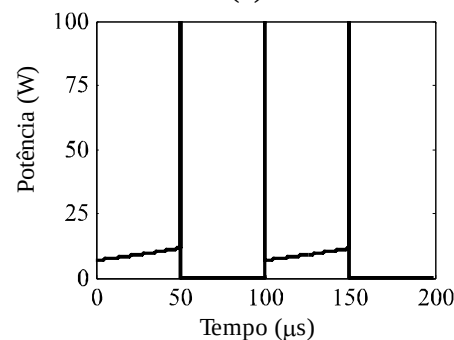
U. Drofenik and J.W. Kolar, “A general scheme for calculating switching- and conduction-losses of power semiconductors in numerical circuit simulations of power electronic systems,” in *Proc. Intern. Power Electron. Conf.*, 2005.

K. Pandya and W. McDaniel, “A simplified method of generating thermal models for power MOSFETs,” in *Proc. IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management*, 2002, pp. 83–87.

K. Pandya, “Thermal simulation of power MOSFETs on the P-Spice platform”, *Vishay Siliconix (AN609)*, Oct. 2005, pp. 1–9.



(a)



(b)

Fig. 3 - Resultados de simulação. (a) Temperatura de junção e de encapsulamento. (b) Potência dissipada

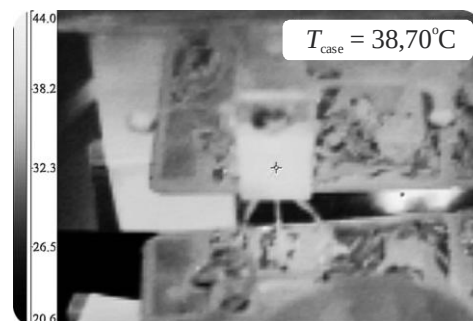


Fig. 4 - Resultados experimentais

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse artigo propôs um algoritmo para estimar as perdas de condução e comutação aliada ao comportamento dinâmico da temperatura de junção de dispositivos semicondutores.

Dessa forma o algoritmo pode ser facilmente inserido na simulação de circuitos de Eletrônica de Potência.

Além disso resultados de simulação e experimental são fornecidos objetivando a validação da análise proposta.