

Um método para estimativa de temperatura de junção de dispositivos IGBT em inversores de tração

Leonardo Rafael Willers*, Eduardo Cattani Silva, Paulo Henrique Alves Silva e Silva*, Lucas Rossato Rocha*, and Rodrigo Padilha Vieira*

*Grupo de Eletrônica de Potência e Controle, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, Brasil
leonardorwillers@gmail.com, cattani98@gmail.com, paulo.ifg21@gmail.com, lucas.rossato@acad.ufsm.br, rodrigo.vieira@ufsm.br

Abstract—This paper presents an approach to estimating the junction temperature of IGBTs in three-phase inverters, crucial for electric vehicle applications. This study carries out the conversion process from Foster to Cauer thermal networks, which enables a space-state representation with intermediate temperature states, such as: internal module and module case temperatures. A Luenberger-type state observer is used to estimate the switch junction temperature. The proposed method demonstrates enhanced robustness and accuracy compared to conventional open-loop thermal models. Simulation results, validated through PSIM software, illustrate the effectiveness of the observer in maintaining temperature estimates within safe operational limits even with incorrect initial states. The findings underscore the potential for improved reliability and lifespan prediction of semiconductor devices in harsh operating conditions.

Index Terms—Thermal networks, junction temperature observer, electric vehicles, three-phase inverter.

I. INTRODUÇÃO

O foco crescente em promover tecnologias sustentáveis e mitigar emissões de gases poluentes transformou fundamentalmente o discurso em torno da mobilidade urbana. Neste cenário em evolução, os veículos elétricos (VEs) surgem como participantes essenciais na busca pelo progresso tecnológico sustentável, devido à sua capacidade de operar sem emitir poluentes (CO_2) [1].

Uma parte importante no desenvolvimento desses veículos elétricos são os conversores estáticos empregados, responsáveis por executar tarefas que vão desde o carregamento do sistema de baixa tensão com módulos de energia auxiliares [2] até o controle do fluxo de energia da bateria para o motor elétrico com o inversor [3]. Pode-se observar que há um custo significativo associado a esses conversores, representando aproximadamente 26-34% do VE [4].

Dessa forma, melhorias nesses conversores foram alcançadas por meio de avanços na tecnologia de comutação de semicondutores, que são objeto de pesquisa em cenários acadêmicos e industriais. Um tópico importante dessas investigações é a análise das perdas de energia desses dispositivos semicondutores e do aumento da temperatura da junção para determinar sua vida útil e limites operacionais em condições transitórias e de estado estacionário, nas condições severas de temperatura e umidade em um veículo elétrico.

Para evitar danos a esses dispositivos, é obrigatório verificar sua temperatura de junção, garantindo que ela fique dentro da classificação máxima do semicondutor. Vários trabalhos

na literatura buscam estimar a temperatura de junção de dispositivos semicondutores, pois medir essa temperatura é difícil e custoso, exigindo equipamentos especiais.

Fabricantes de dispositivos semicondutores fornecem circuitos elétricos que representam o comportamento térmico desses componentes. Essas redes térmicas equivalentes podem ter dois formatos, Foster ou Cauer, e por meio delas, a temperatura da junção pode ser determinada. Modelos térmicos equivalentes como a rede Foster representam o comportamento empírico do sistema, enquanto a rede Cauer representa o comportamento físico, o que facilita a análise comportamental. Em [5], algoritmos rápidos, desviados de relações recursivas são aplicados para realizar a conversão entre essas duas redes. Em [6] os autores propõem um observador, baseado no design de um sensor virtual para estimar a temperatura da junção.

O trabalho [7] incorpora um mecanismo de compensação de malha fechada no observador térmico para mitigar os efeitos das incertezas dos parâmetros na estimativa de perda de potência. O trabalho aborda um observador de ordem reduzida, utilizando medições da temperatura do ar de entrada e um termistor montado no substrato do módulo de potência.

Um observador de ordem completa é proposto como um método online para estimar a temperatura de junção de um IGBT em [8], no entanto, a estratégia empregada é válida para quaisquer dispositivos com estruturas multicamadas. O observador é mais robusto do que métodos que usam modelos térmicos, pois a matriz de feedback do observador pode corrigir erros causados por imprecisão de parâmetros e estados iniciais incorretos. A validação da proposta foi confirmada em simulação, usando o método FEA (*Finite Element Analysis* - Análise de Elementos Finitos) e em uma bancada prática.

Os observadores também podem estimar a temperatura da junção levando em consideração o envelhecimento termelétrico acelerado dos dispositivos, prevendo falhas potenciais e vida útil esperada. Em [9] um observador foi implementado com esse objetivo, resultando em confiabilidade e precisão na estimativa da temperatura da junção e consequentemente na estimativa da vida útil.

Em [10], um modelo térmico combinado com medições de temperatura foi empregado para estimar a temperatura da junção sem ser necessário conhecer as informações confidenciais do fabricante. Entre os métodos avaliados, o estimador de segunda ordem teve o melhor desempenho para aplicação em controle térmico ativo, destacando a precisão e eficiência.

Neste artigo, uma topologia trifásica de dois níveis será usada para avaliar o desempenho do método proposto, dada a prevalência desta topologia para VEs [11]. O módulo de meia ponte selecionado tem os parâmetros detalhados na Tabela I. O conversor de meia ponte é ajustado para operar com uma tensão de barramento CC de 400 V e frequência de chaveamento de 50 kHz.

TABELA I
PARÂMETROS DA FOLHA DE DADOS DO MÓDULO SEMICONDUTOR

Parâmetro	Definição	Valor
V_{CC}	Tensão do barramento CC do inversor	400 V_{CC}
$V_{CC,datasheet}$	Tensão CC de ensaio	300 V_{CC}
f_s	Frequência de comutação da chave	50 kHz
u_{CE0}	Tensão direta em condução do IGBT	73,33 mV
r_C	Resistência coletor-emissor do IGBT	6,13 mΩ
u_{D0}	Tensão direta em condução do diodo	950 mV
r_D	Resistência coletor-emissor do diodo	3,2 mΩ

Aqui, um observador Luenberger baseado em redes térmicas de Cauer foi implementado para monitorar a temperatura de junção do dispositivo semicondutor. Além de detalhar a conversão dessas redes. A eficácia da proposta foi analisada e validada por meio de simulação e os resultados obtidos foram posteriormente discutidos. O método proposto pode ser usado em outros tipos de chaves, como MOSFETs.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta o modelo do inversor e as expressões para cálculo de perdas, os modelos equivalentes de Cauer e Foster são discutidos; a Seção III fornece o modelo diferencial do sistema térmico e do observador; a Seção IV apresenta os resultados e a discussão e, finalmente, a Seção V resume as principais descobertas do esquema proposto.

II. MODELAGEM DE SISTEMAS TÉRMICOS DE INVERSORES

A. Perdas instantâneas de potência

Perdas em dispositivos semicondutores são tipicamente divididas em duas partes: perdas de condução, como resultado de tensão e corrente simultâneas sobre o dispositivo; e perdas de comutação, devido à transição dos estados no módulo de meia ponte. Cada dispositivo apresenta uma característica específica quanto à energia dissipada na comutação e às perdas resultantes do fluxo de corrente [12]. Essas informações são geralmente fornecidas pelos fabricantes, por exemplo, os dados para o dispositivo semicondutor deste estudo.

As perdas de potência em cada período de comutação podem ser calculadas usando as seguintes expressões que calculam as perdas de comutação e condução somadas, do IGBT e diodo, respectivamente [13],

$$P_{loss,I} = u_{CE0}I_d + r_C I_d^2 + \frac{f_s(E_{on} + E_{off})V_{CC}}{V_{CC,datasheet}}, \quad (1)$$

e

$$P_{loss,D} = (u_{D0}I_d + r_D I_d^2)d + \frac{f_s E_{rr} V_{CC}}{V_{CC,datasheet}}, \quad (2)$$

onde, d é o ciclo de trabalho (*duty-cycle*), I_d é a corrente de dreno da chave, V_{CC} é a tensão do barramento

CC, $V_{CC,datasheet}$ é a tensão CC utilizada nos ensaios de determinação das curvas de energia pela fabricante, f_s é a frequência de comutação, E_{on} representa a energia no IGBT no período de entrada de condução e E_{off} na transição para bloqueio, e E_{rr} é a energia de recuperação reversa do diodo interno com conexão em anti-paralelo.

Para determinar as perdas instantâneas de condução, foi utilizada uma aproximação considerando uma conexão em série de uma fonte de tensão contínua u_{CE0} representando a tensão coletor-emissor de corrente zero no IGBT e uma resistência coletor-emissor (r_C). O mesmo foi feito para o diodo, sendo a fonte equivalente de tensão u_{D0} e a resistência coletor-emissor r_D . Esses parâmetros foram extraídos da curva de tensão coletor-emissor em relação á corrente de coletor no IGBT e na curva de tensão direta em relação á corrente direta no diodo. As energias de entrada em condução e bloqueio do IGBT e a energia de recuperação reversa do diodo dependem da corrente de dreno, então devem ser atualizado de acordo com as seguintes expressões,

$$E_{on} = I_d(6,6 \cdot 10^{-6} + 3 \cdot 10^{-8}I_d) + 5,5 \cdot 10^{-4}, \quad (3)$$

$$E_{off} = I_d(2,87 \cdot 10^{-5} + 4 \cdot 10^{-8}I_d) + 7 \cdot 10^{-4}, \quad (4)$$

e,

$$E_{rr} = I_d(9,99 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-8}I_d) + 5 \cdot 10^{-4}. \quad (5)$$

Os parâmetros utilizados no estudo foram apresentados na Tabela I [14].

B. Modelo térmico equivalente

A junção do dispositivo é inacessível para medição direta da temperatura, além de correr o risco de comprometer o desempenho do dispositivo com a utilização de métodos invasivos. Portanto a opção viável é a estimativa indireta da temperatura da junção, com base em medições externas disponíveis, como a temperatura do case do dispositivo e ou do dissipador de calor [9]. Esses detalhes podem ser vistos mais claramente na Figura 1.

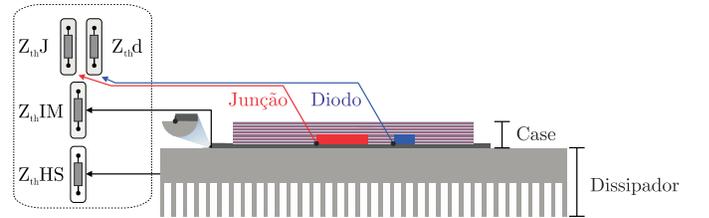


Fig. 1. Representação do sistema termoeletrico.

Dessa forma, é possível obter um circuito elétrico equivalente visando representar o comportamento térmico do sistema. Existem dois modelos amplamente utilizados na literatura para modelagem térmica: rede de Foster e rede de Cauer. Esses modelos representam a dinâmica térmica como circuitos elétricos para facilitar a análise, empregando um arranjo de capacitores e resistências, conforme Figura 2.

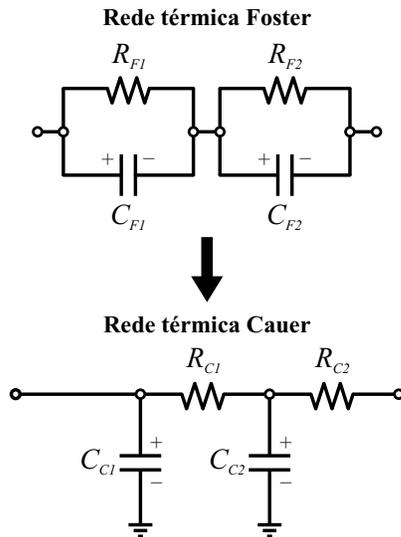


Fig. 2. Redes térmicas Foster e Cauer.

Redes térmicas do tipo Foster, geralmente disponibilizadas pelas fabricantes de semicondutores, fazem referência a uma análise empírica do sistema, dificultando a interpretação, enquanto que redes Cauer fornecem informações detalhadas sobre as temperaturas intermediárias do sistema, mantendo um significado físico dessa representação [15].

Neste artigo, um módulo IGBT é usado para o estudo. O fabricante disponibiliza uma rede Foster térmica. No entanto, este artigo propõe um observador de temperatura de junção baseado em uma rede Cauer. Então, um método para conversão de rede Foster para rede Cauer é apresentado na subseção a seguir.

C. Representação da rede de Foster para Cauer

Conversões entre redes térmicas são necessárias para adaptar o sistema de acordo com as necessidades de cada projeto, no entanto, essas conversões geralmente usam expressões complexas, por exemplo em [16], é apresentada uma conversão com derivações de expressões explícitas usando várias matrizes de transformação de estado, relacionando diferentes realizações equivalentes.

Da mesma forma, em [17], é realizada a caracterização e modelagem de uma estrutura eletrotérmica de sistemas microeletromecânicos (MEMS - *Micro-Electro-Mechanical Systems*), onde também é necessário converter a rede térmica de Foster para rede de Cauer. O objetivo da conversão é obter um sentido físico real para o cantilever com resistores e capacitâncias térmicas concentradas. Essa conversão foi realizada através dos polos e constantes de tempo do sistema.

Neste artigo, as redes térmicas de Foster do IGBT e do diodo foram simplificadas de quarta ordem para segunda ordem e posteriormente foram convertidas em redes térmicas equivalentes de Cauer usando um script de software Matlab, disponível em [18]. Este script executa operações de matriz para construir a escada RC do tipo Cauer equivalente à cadeia RC do tipo Foster.

O sistema térmico equivalente completo, contendo as redes térmicas do IGBT e do diodo, que representa a dinâmica de todo o módulo semicondutor, convertido para Cauer, é apresentado na Figura 3 e é detalhado e explorado na próxima seção.

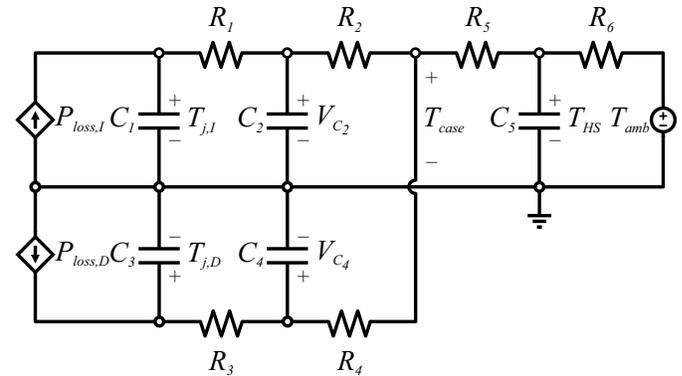


Fig. 3. Rede elétrica equivalente térmica completa.

III. OBSERVADOR DE TEMPERATURA DE JUNÇÃO BASEADO NA REDE CAUER

A partir da Figura 3, é possível obter diferentes tensões através de capacitores onde essas tensões representam diferentes temperaturas do sistema [15]. Na rede modelada, há três entradas: $P_{loss,I}$, $P_{loss,D}$ e T_{amb} , que são as perdas elétricas (vide (1)-(2)) e a temperatura ambiente. A temperatura de junção do IGBT e do diodo interno no módulo são representadas como as tensões sobre os capacitores C_1 e C_3 , respectivamente, enquanto que a tensão sobre o capacitor C_5 representa a temperatura do dissipador de calor. Os parâmetros R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , C_1 , C_2 , C_3 e C_4 representam o comportamento térmico do módulo da chave semicondutora. R_5 representa a pasta térmica, enquanto R_6 e C_5 descrevem o modelo do dissipador de calor.

A partir dos dados do fabricante e do processo apresentado na subseção II-C, é possível obter os valores numéricos para os parâmetros do circuito elétrico apresentados na Figura 3, retratados na Tabela II.

TABELA II
PARÂMETROS DA REDE CAUER EQUIVALENTE

Parâmetro	Valor
R_1	170.007 $m\Omega$
R_2	49.930 $m\Omega$
R_3	324.678 $m\Omega$
R_4	95.322 $m\Omega$
R_5	90 $\mu\Omega$
R_6	18.32 $m\Omega$
C_1	142.939 mF
C_2	300.169 mF
C_3	74.873 mF
C_4	157.232 mF
C_5	3275 F

O conjunto de equações diferenciais para modelar a rede de Cauer é dado por,

$$\dot{T}_{j,I} = \frac{v_{C_2}}{R_1 C_1} + \frac{P_{loss,I}}{C_1} - \frac{T_{j,I}}{R_1 C_1} \quad (6)$$

$$\dot{v}_{C_2} = \frac{T_{j,I}}{R_1 C_2} - \frac{v_{C_2}}{R_1 C_2} - \frac{v_{C_2}}{R_{25} C_2} + \frac{v_{C_5}}{R_{25} C_2} \quad (7)$$

$$\dot{T}_{j,D} = \frac{v_{C_4}}{R_3 C_3} + \frac{P_{loss,D}}{C_3} - \frac{T_{j,D}}{R_3 C_3} \quad (8)$$

$$\dot{v}_{C_4} = \frac{T_{j,D}}{R_3 C_4} - \frac{v_{C_4}}{R_3 C_4} - \frac{v_{C_4}}{R_{45} C_4} + \frac{v_{C_5}}{R_{45} C_4} \quad (9)$$

$$\dot{T}_{HS} = \frac{v_{C_2} - T_{HS}}{R_{25} C_5} + \frac{v_{C_4} - T_{HS}}{R_{45} C_5} + \frac{T_{amb} - T_{HS}}{R_6 C_5} \quad (10)$$

onde, $T_{j,I}$ é a temperatura da junção do IGBT e $T_{j,D}$ a temperatura da junção do diodo, além de serem variáveis de estado. Além disso, v_{C_2} , v_{C_4} e T_{HS} são variáveis de estado do modelo. Para simplificação do sistema, as expressões $(R_2 + R_5)$ e $(R_4 + R_5)$ foram substituídas por R_{25} e R_{45} , respectivamente.

Aqui, um modelo de espaço de estados é obtido para a representação do sistema, como,

$$\begin{aligned} \mathbf{K}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (11)$$

onde,

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [T_{j,I} \quad v_{C_2} \quad T_{j,D} \quad v_{C_4} \quad T_{HS}]^T, \\ \mathbf{u} &= [P_{loss,I} \quad P_{loss,D} \quad T_{amb}]^T. \end{aligned}$$

Além disso, T_{HS} é assumido como a saída do sistema, \mathbf{K} , \mathbf{A} , \mathbf{B} e \mathbf{C} são dados por,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_5 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_1} & \frac{1}{R_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_1} & \frac{-1}{R_1} + \frac{-1}{R_{25}} & 0 & 0 & \frac{1}{R_{25}} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{R_3} & \frac{1}{R_3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_3} & \frac{-1}{R_3} + \frac{-1}{R_{45}} & \frac{1}{R_{45}} \\ 0 & \frac{1}{R_{25}} & 0 & \frac{1}{R_{45}} & \frac{-1}{R_{25}} + \frac{-1}{R_{45}} + \frac{-1}{R_6} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_6} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1].$$

A. Observador de estados

Métodos de estimativa de temperatura de junção que usam observadores são considerados mais robustos do que aqueles que dependem exclusivamente de modelos térmicos. Isso ocorre porque o observador pode corrigir erros resultantes da imprecisão dos parâmetros, especialmente estados iniciais incorretos [8].

Um observador de estados do tipo Luenberger é usado para estimar a temperatura da junção da chave, com um ganho (L) definido como 1000. A saída do modelo é a temperatura do dissipador de calor T_{HS} , que pode ser medida e é comparada ao valor observado, da seguinte forma:

$$\mathbf{K}\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{L}(\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}), \quad (12)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \hat{T}_{HS} \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{y}}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{T}_{j,I} \\ \hat{v}_{C_2} \\ \hat{T}_{j,D} \\ \hat{v}_{C_4} \\ \hat{T}_{HS} \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{x}}}. \quad (13)$$

O diagrama do observador de estados Luenberger implementado é apresentado na Figura 4, onde o símbolo \wedge representa valor estimado.

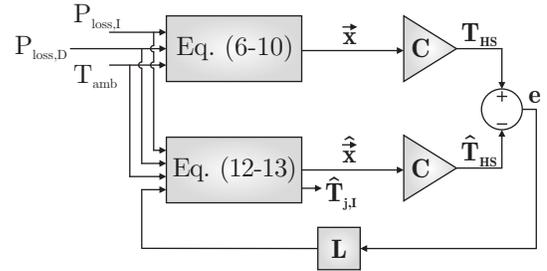


Fig. 4. Diagrama do observador Luenberger.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, o método proposto será avaliado com base em simulações realizadas pelo software PSIM. Neste software, é possível simular chaves com características termoelétricas com base nos parâmetros do *datasheet* do fabricante, permitindo a análise de perdas e elevação de temperatura do semiconductor.

O esquema desta simulação é apresentado na Figura 5. Este esquema é composto por uma fonte de alimentação de tensão, seis módulos IGBT tendo diodos internos em conexão anti-paralela, com uma temperatura inicial de 25°C e uma carga RL trifásica, onde $R = 0,0729\Omega$ e $L = 56,2\mu\text{H}$. Os semicondutores são acionados por modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) com referência senoidal. O barramento de tensão CC foi ajustado em 400 V. No resultado da simulação, foi drenada uma corrente de fase inicial de 16 A RMS na carga, então para uma carga constante o índice de modulação é inicialmente ajustado para

40%. Para simular um aumento nas perdas nas chaves o índice de modulação é alterado para 90% em 0,35s, o que resulta em um incremento das correntes de fase de 16 A para 34 A. Essa mudança no índice de modulação permite a análise do sistema em operações transitórias e em estado estacionário. Além disso, o observador é implementado em um bloco de codificação escrito em linguagem de programação C, onde as entradas são as correntes medidas e a temperatura do dissipador de calor.

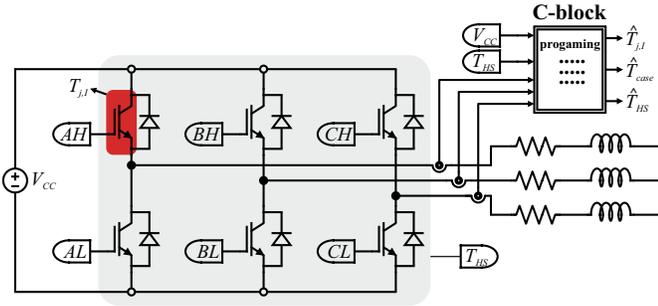


Fig. 5. Esquema de simulação do PSIM.

Os resultados da simulação serão divididos em duas subseções: análise de perdas e temperatura das chaves. Pode-se observar que apenas uma chave das seis será usada para a análise da temperatura e perdas, devido à simetria entre os dispositivos de ponte e as fases.

A. Análise de perdas

O primeiro passo para garantir a operação adequada do observador é avaliar a estimativa de perdas de comutação realizada com base nas Equações (1)-(5). Na Figura 6 as perdas totais do modelo PSIM (P_{loss}) e as perdas estimadas (\hat{P}_{loss}) são comparadas, sendo somadas as perdas do IGBT e do diodo em cada caso.

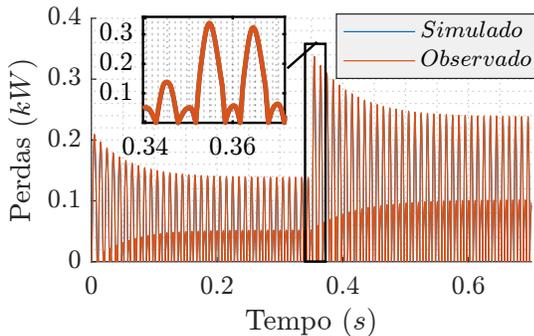


Fig. 6. Perdas de referência e estimadas da simulação.

É possível verificar o forte aumento nas perdas em 0,35s devido ao aumento do *duty cycle* e da corrente no semicondutor. Este aumento não linear é devido à relação quadrática entre perdas de condução e corrente, além da relação também não linear de perdas de comutação em relação à corrente.

Do ponto de vista do desempenho do método, as perdas estimadas e de referência têm um alto grau de similaridade claramente visível na ampliação de potência instantânea apresentada na Figura 6. Então, com base neste resultado, é possível perceber que a estimativa adequada das perdas alimentará adequadamente o observador.

B. Análise de temperatura

Nesta subseção, o desempenho do observador será avaliado, com base na temperatura de junção do IGBT, que é prevalente em relação à temperatura de junção do diodo. Neste teste, tanto a estimativa de malha aberta da temperatura (\hat{T}_j) com base nas perdas quanto o modelo térmico apresentado na seção III e a temperatura do observador de malha fechada ($\hat{T}_{j,obs}$) definida pelas Equações (12)-(13) serão comparados com a referência da temperatura do modelo IGBT do software (T_j). Para ilustrar a robustez da operação da abordagem de malha fechada sobre a de malha aberta, a temperatura inicial de 25°C dos interruptores será definida incorretamente nas equações como 35°C. Os resultados são descritos na Figura 7.

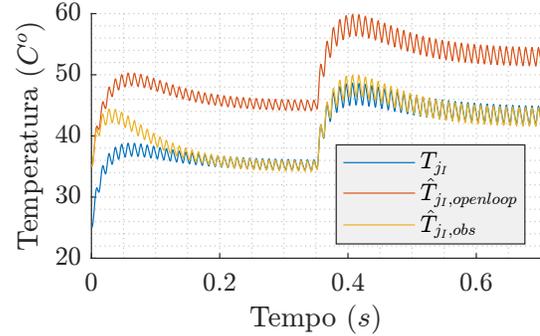


Fig. 7. Curvas de temperatura de junção, valor estimado e do modelo do PSIM.

O *duty cycle* e o passo atual em 0,35s também são visíveis nesta figura, resultando em um aumento significativo na temperatura devido a este aumento. A estimativa de temperatura em malha aberta apresenta uma alta fidelidade da forma de onda com a referência, mas a inicialização incorreta da temperatura resultou em um deslocamento, o que ilustra a vulnerabilidade desta abordagem. Por outro lado, a estimativa do observador rastreou rapidamente a temperatura e rejeitou o erro de temperatura inicial. Além disso, com base na ampliação, é possível perceber que tanto a temperatura média quanto a ondulação são estimadas com precisão. O método proposto é validado devido ao seu desempenho e robustez adequados.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi apresentado um método robusto para estimar a temperatura da junção em inversores trifásicos. Semicondutores do tipo IGBTs foram usados, no entanto, o método é válido para outros dispositivos semicondutores. A abordagem proposta baseada em observador alavanca um

modelo de rede térmica equivalente de Cauer, permitindo uma estimativa de temperatura precisa e confiável, apesar das incertezas nos estados iniciais. O método proposto foi validado por meio de simulações usando o software PSIM, onde demonstrou desempenho superior em comparação aos métodos tradicionais baseados em modelos térmicos. O observador efetivamente atenua erros devido a estados iniciais incorretos, garantindo assim que a temperatura da junção permaneça dentro dos limites operacionais seguros. As descobertas destacam o potencial para maior confiabilidade e vida útil prevista de dispositivos semicondutores sob condições operacionais adversas.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código Financeiro 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] A. K. Gupta, A. K. Jha, S. Singh, S. N. Saha and S. K. Singh, "A comparative review on electric vehicles and hybrid vehicles," 2022 1st IEEE International Conference on Industrial Electronics: Developments & Applications (ICIDEA), Bhubaneswar, India, 2022, pp. 83-88, doi: 10.1109/ICIDEA53933.2022.9970039.
- [2] Liyan Zhu, Hua Bai, Alan Brown, and Matt Mcammond, "Design a 400V 6 kW Bidirectional Auxiliary Power Module for Electric or Autonomous Vehicles With Fast Precharge Dynamics and Zero DC-Bias Current", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, pp. 5323–5335, 2021.
- [3] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition", CRC Press, 2009. ISBN 9781420054002.
- [4] P. H. A. S. e Silva, E. C. da Silva, L. R. Rocha, P. R. Eckert and R. P. Vieira, "Analysis and Modeling of a Liquid Cooled Heat Sink for EV Traction Inverter Systems," 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), Anaheim, CA, USA, 2022, pp. 825-830, doi: 10.1109/ITEC53557.2022.9813808.
- [5] Y. C. Gerstenmaier, W. Kiffe and G. Wachutka, "Combination of thermal subsystems modeled by rapid circuit transformation," 2007 13th International Workshop on Thermal Investigation of ICs and Systems (THERMINIC), Budapest, Hungary, 2007, pp. 115-120, doi: 10.1109/THERMINIC.2007.4451758.
- [6] T. N. Kabwangala, J. -P. Fradin, Y. Ariba, A. Marie and F. Gouaisbaut, "Observer based junction temperature estimation : 3D simulations and experimentations," 2023 29th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), Budapest, Hungary, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/THERMINIC60375.2023.10325885.
- [7] X. Dong, A. Griffo, D. Hewitt and J. Wang, "Reduced-Order Thermal Observer for Power Modules Temperature Estimation," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 12, pp. 10085-10094, Dec. 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2959483.
- [8] X. Wang, A. Castellazzi and P. Zanchetta, "Full-order observer based IGBT temperature online estimation," IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, TX, USA, 2014, pp. 1494-1498, doi: 10.1109/IECON.2014.7048699.
- [9] A. Ginart, I. N. Ali, I. Barlas, P. W. Kalgren, M. J. Roemer and K. Goebel, "Observer based junction temperature estimator in thermoelectrical aging," 2010 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2010, pp. 1-9, doi: 10.1109/AERO.2010.5446831.
- [10] M. Andresen, M. Schloh, G. Buticchi and M. Liserre, "Computational light junction temperature estimator for active thermal control," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, USA, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/ECCE.2016.7854953.
- [11] John Reimers, Lea Dorn-Gomba, Christopher Mak, and Ali Emadi, "Automotive Traction Inverters: Current Status and Future Trends," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 4, pp. 3337-3350, 2019. doi: 10.1109/TVT.2019.2897899.
- [12] M. Fakhmanesh, C. M. Hackl and R. Perini, "Instantaneous conduction and switching losses in two-level voltage source inverters," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, Italy, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977671.
- [13] D. Graovac, M. Purschel, "IGBT powerlosses calculation using the data-sheet parameters", Infineon application note, vol. 1, Infineon Technologies AG, 2009.
- [14] Infineon, "Technical Information IGBT-modules: FF200R06KE3", 2013.
- [15] H. M. N. Achiri, "Analytical Models for IGBT Junction Temperature Estimation", Dissertation to earn the academic degree Ph.D. in the field Electronics/Electrical Power Engineering/Electrical Engineering, University of West Bohemia Faculty of Electrical Engineering, Pilsen, Tchéquia, 2022.
- [16] K. Murthy and R. Bedford, "Transformation between Foster and Cauer equivalent networks," in IEEE Transactions on Circuits and Systems, vol. 25, no. 4, pp. 238-239, April 1978, doi: 10.1109/TCS.1978.1084459.
- [17] P. G. Szabo and V. Szekely, "Characterization and modeling of an electro-thermal MEMS structure," 2008 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, Nice, France, 2008, pp. 350-354, doi: 10.1109/DTIP.2008.4753016.
- [18] B. Ufnalski (2024). Foster and Cauer equivalent networks (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/48042-foster-and-cauer-equivalent-networks>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved May 13, 2024.