

Avaliação da capacidade de troca térmica de dissipadores com resfriamento líquido aplicados a inversores de tração elétrica *

Paulo Henrique Alves Silva e Silva * Eduardo Cattani Silva *
Lucas Rossato Rocha * Paulo R.Eckert ** Rodrigo Padilha Vieira *

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, RS (e-mails: paulo.ifg21@gmail.com, lucas_rrocha@hotmail.com, cattani98@gmail.com, rodrigovie@gmail.com).

** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS (e-mail: paulo.eckert@ufrgs.br)

Abstract: High performance inverters are key components in electrical applications. The operating capacity, efficiency and life cycle of inverters can be limited by the magnitude of losses and external factors such as ambient temperature and humidity. To attenuate high levels of temperature, the use of heat exchange systems with liquid cooling is recurrent to reduce the temperature level and increase the full efficiency of the system. This paper presents the thermal study of losses in power modules and liquid cooling sinks that are performed and implemented in ANSYS to obtain thermal parameters, using *Finite Elements Analysis* (FEA). From the thermal impedance of the system and implementation of the Foster thermal network, the heatsink is validated in the *software* Typhoon Hil, making it possible to obtain the heatsink's cooling profile for different loads connected to a three-phase inverter. In the validation step, a 50 kW RL load was connected to the three-phase inverter to evaluate the heatsink cooling capacity for different inverter operating conditions.

Resumo: Os inversores de alto desempenho são componentes chave em aplicações elétricas. A capacidade de operação, eficiência e ciclo de vida dos inversores podem ser limitados pela magnitude das perdas e fatores externos como temperatura ambiente e umidade. Para atenuar níveis elevados de temperatura é recorrente o uso de sistemas de troca térmica com refrigeração líquida para redução do nível de temperatura e aumento da eficiência geral do sistema. Este artigo apresenta o estudo térmico das perdas em módulos de potência e dissipadores de resfriamento líquido são realizados e implementados em ANSYS para obtenção de parâmetros térmicos, utilizando *Finite Elements Analysis* (FEA). A partir da impedância térmica do sistema e implementação da rede térmica de Foster o dissipador é validado no *software* Typhoon Hil, possibilitando obter o perfil de resfriamento do dissipador para diferentes cargas conectadas a um inversor trifásico. Na etapa de validação, uma carga RL de 50 kW foi conectada ao inversor trifásico para avaliar a capacidade de resfriamento do dissipador para diferentes condições de operação do inversor.

Keywords: ANSYS, finite elements analysis, Foster thermal, SiC MOSFET and Typhoon Hil.

Palavras-chaves: ANSYS, análise em elementos finitos, rede térmica de Foster, SiC MOSFET e Typhoon Hil.

1. INTRODUÇÃO

O avanço da eletrônica de potência e sistemas microprocessados de alto desempenho permitem aos inversores de tração veicular elevada densidade de potência, tornando-os capazes de operar sob elevadas faixas de tensão e corrente, especialmente quando *Silicon Carbide Metal Oxide Semi-*

* O presente trabalho foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Finanças 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq e Fundação para o Desenvolvimento da Pesquisa-Fundep Rota 2030/Linha V 27192.03.01/2020.12-00.

conductor Field Effect Transistors (SiC MOSFETs) são utilizados (Yu et al., 2021).

Esses dispositivos de potência operam com elevados valores de corrente, temperaturas, umidade são aplicados em setores da indústria, aeronáutica e, sobretudo, em Veículos Elétricos (VE) (Nawawi et al., 2016). Segundo Nemeth et al. (2018), os custos de sistemas eletrônicos de potência em VEs podem representar, aproximadamente, 26,34 %. Nessa perspectiva, os SiC MOSFETs apresentam vantagens em relação aos IGBTs em frequência de operação, densidade de potência e gerenciamento térmico. Soltau et al. (2020) em estudo comparativo entre SiC e IGBT, com tensão de

operação de 3,3 kV, mostraram que as perdas do sistemas podem ser reduzidas em 59 % utilizando SiC MOSFET, permitindo diminuir custos de projeto e tamanho de inversores.

Em aplicações de elevada densidade potência e processamento de energia, o nível de temperatura do sistema torna-se um fator fundamental de projeto, visto que as principais falhas em dispositivos eletrônicos de potência são causadas por sobreaquecimento (Chen et al., 2020). Nesse sentido, o gerenciamento térmico do sistema de potência surge como alternativa para mitigar níveis excessivos de temperatura em módulos de potência. Esse gerenciamento pode ocorrer através do resfriamento do dissipador de calor que é composto por uma placa fria, de material cobre ou alumínio, com uso de ventilação forçada ou refrigeração líquida.

Staunton et al. (2006) realizaram um estudo sobre o modelo de dissipador com haletas retas utilizado no inversor do veículo 2005 Honda Accord, no qual a troca térmica com meio externo é mediada por ventilação forçada. Um estudo sobre diferentes modelos com resfriamento líquido utilizando múltiplas serpentinas e múltiplas entradas e saídas de líquido em paralelo são abordados em Imran et al. (2018). Han et al. (2021), por sua vez, realizaram um estudo para múltiplas topologias de dissipadores com resfriamento líquido, considerando diferentes regimes de operação da velocidade e pressão do líquido de resfriamento. Nesse trabalho, são estudados canais para o fluido unidirecionais e modelos de múltiplas entradas e saídas.

Um estudo sobre microcanais, em similaridade a estrutura do pulmão humano, são desenvolvidos em (Ki et al., 2021). Nesse trabalho, existem microcanais de cobre que conectam entrada e saída do líquido, possibilitando troca térmica eficiente com baixa pressão. Um estudo sobre a capacidade de troca térmica, pressão do líquido e variação de temperatura são abordados para duas topologias de dissipadores em serpentina e com haletas internas com formatos retangulares utilizados para troca térmica de um inversor trifásico (Mademlis et al., 2021).

Dessa forma, o presente trabalho realiza um dimensionamento de um dissipador com resfriamento líquido e validação da capacidade de troca térmico através dos *softwares* ANSYS e Typhoon Hil, respectivamente. Essa implementação permite avaliar a capacidade de resfriamento do dissipador com resfriamento líquido para diferentes condições de operação de um inversor que alimenta uma carga RL de 50 kW. Essa validação é mediada pela rede térmica de Foster para determinação da temperatura do sistema. Os parâmetros da rede térmica são obtidas através da *Finite Elements Analysis* (FEA) para o dissipador de resfriamento líquido, enquanto módulos de potência por meio de *datasheet* comercial.

O trabalho, portanto, está organizado da seguinte forma: A seção 2 apresenta uma abordagem sobre SiC MOSFETs, perdas envolvidas e modelo térmico do módulo de potência; Uma abordagem sobre topologias de dissipadores de calor é realizada na seção 3; A seção 4 é realizado um estudo térmico para 400 W dissipadas por chaves do inversor, considerando o dissipador com diferentes tipos de líquidos para obtenção de parâmetros térmicos do dissipador com abordagem FEA no *software* ANSYS . Dessa forma, a seção 5 aborda a implementação dos parâmetros obtidos

em ANSYS através da rede térmica de Foster no Typhoon Hil. Nessa seção, uma carga RL de 50 kW é utilizada como carga para conexão com um inversor trifásico e, por fim, na seção 6 conclusões são feitas a respeito do trabalho.

2. INVERSOR TRIFÁSICO

O inversor trifásico é um conversor CC/CA (contínuo/alternado) da tensão oriunda do barramento. O inversor é composto por três braços que representam as fases do conversor e são acionados por um sinal *Pulse Width Modulation* (PWM) que ativam ou desativam os transistores de potência para operação na frequência de comutação desejada. A estrutura do inversor trifásico é apresentada na Figura 1:

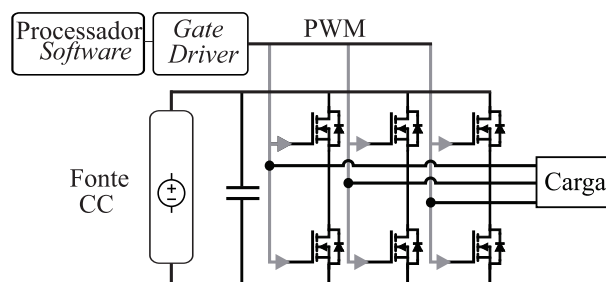


Figura 1. Estrutura do inversor trifásico.

O estudo das perdas e modelo térmico são abordados nas subseções 2.1 e 2.2.

2.1 Estudo das perdas das chaves

As perdas elétricas dos SiC MOSFETs são originadas na etapas de chaveamento e de condução elétrica. A definição de frequência de chaveamento adequada e dos dispositivos de potência aumentam a eficiência do inversor, devido a redução temperatura de junção do SiC MOSFET. Conforme Han et al. (2021), as perdas elétricas por condução são apresentadas em (1) e (2):

$$P_{\text{cond}} = I_{\text{rms}}^2 \cdot R_{\text{DSon}}, \quad (1)$$

$$P_S = F_s \cdot (E_{\text{on}} + E_{\text{off}}) \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_{\text{rms}}}{I_{\text{ref}}} \cdot \frac{V_{\text{DC}}}{V_{\text{ref}}}, \quad (2)$$

em que I_{rms} e I_{ref} representam a corrente RMS e referência; V_{DC} e V_{ref} a tensão do barramento e tensão nominal de operação; E_{on} e E_{off} representam a energia dissipada pela chave durante período de ativação e desativação; R_{DSon} a resistência interna da chave; F_s a frequência de chaveamento. O SiC MOSFET MSCSM70AM19CT1AG foi escolhido para compor o estudo térmico do inversor trifásico, pois o mesmo apresenta menores perdas e maior densidade de potência em relação aos IGBTs. O *datasheet* do SiC comercial é apresentado, simplificada, na Tabela 1:

2.2 Modelo térmico do SiC MOSFET

O sistema térmico pode ser representado, analogamente, em um circuito elétrico. A representação do circuito térmico é obtido pela rede térmica de Foster, que é composta por resistências e capacitâncias em paralelo (Bahman et al., 2016). A Figura 2 representa a relação entre

Tabela 1. Parâmetros do SiC MOSFET MSCSM70AM19CT1AG.

Parâmetros	Valores
Tensão máxima de dreno (V_{DSS})	700 V
Corrente máxima de dreno (I_D)	124 A
Tensão máxima de gate (V_{Dson})	-10/25 V
Resistência interna (R_{Dson})	19 mΩ
Temperatura máxima da junção	175°C

as impedâncias do SiC MOSFET, interface do material e dissipador com resfriamento líquido.

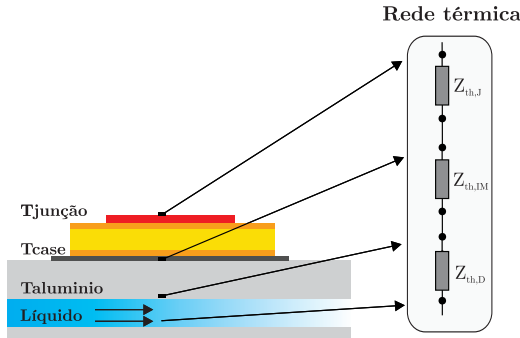


Figura 2. Representação do SiC MOSFET e Dissipador com resfriamento líquido.

A impedância térmica do sistema é obtida através de (3) (Zhang et al., 2018):

$$Z_{th,total} = Z_{th,J} + Z_{th,IM} + Z_{th,D}, \quad (3)$$

em que a impedância térmica da junção é ($Z_{th,J}$); interface do material ($Z_{th,IM}$), que representa a conexão entre fonte de calor e dissipador através de pasta térmica ou *thermal pads*; A impedância térmica do dissipador ($Z_{th,D}$) são componentes da rede térmica. A temperatura da junção ($T_{junção}$); a temperatura do case (contato do SiC MOSFET e dissipador) (T_{case}); Temperatura do dissipador (Alumínio).

A impedância térmica do sistema pode ser obtida, simplificada, usando (4) (Yu et al., 2021):

$$Z_{th,total} = \frac{(T_J - T_a)}{P_{loss}}, \quad (4)$$

onde ($Z_{th,total}$) é a impedância térmica total, (T_a) é a temperatura ambiente e (P_{loss}) são as perdas totais do sistema, dada por (5):

$$P_{loss} = P_{cond} + P_S. \quad (5)$$

As perdas do sistema representam fluxo de calor dissipado pelo módulo SiC sobre o dissipador de calor, sob o contato da pasta térmica. O fluxo de calor gerado pelo módulo SiC a partir da potência dissipada é dada pela equação (6) (Bahman et al., 2016):

$$F_c = \frac{q}{\Delta T}, \quad (6)$$

em que (F_c) representa o fluxo de calor, (q) a potência dissipada por área pelo SiC e (ΔT) a variação de temperatura do módulo e superfície do dissipador. Os parâmetros da impedância térmica do SiC MOSFET, obtidos em *datasheet*, são utilizadas para cálculo da temperatura de junção do módulo pela rede de Foster são apresentados na Figura 3:

A temperatura da junção pode ser obtida através das equações (4) e (5), utilizando os dados de impedância térmica presentes na Figura 3.

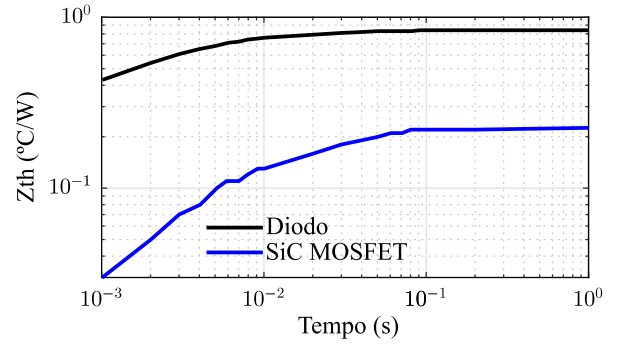


Figura 3. Impedância térmica da chave e diodo do SiC MOSFET.

3. TOPOLOGIAS DE DISSIPADORES DE CALOR

As diferentes topologias de dissipadores de calor são medidas de gerenciamento térmico que visam troca térmica entre dispositivos de potência e ambiente externo. Nesses dissipadores, diferentes técnicas de resfriamento podem ser utilizadas. Das quais destacam-se os resfriamentos externos ou indiretos, diretos ou integrados e resfriamento duplo (Jones-Jackson et al., 2022). Estes métodos de resfriamento são amplamente recorrentes em aplicações industriais, sobretudo, em sistemas de tração elétrica, como apresenta a Tabela 2, onde *Water Etylene Glycol* (WEG) representa uma mistura entre água líquida e etilenoglicol.

3.1 Resfriamento indireto/externo

Os dissipadores com resfriamento indireto baseiam-se na troca de calor do meio com o ambiente externo por meio de haletas externas com ventilação forçada. Esses dissipadores são volumosos e pouco eficientes para elevadas cargas térmicas. Os primeiros modelos de veículos elétricos a utilizarem estas técnicas em inversores são encontrados no veículo *2005 Honda Accord* (Staunton et al., 2006).

3.2 Resfriamento direto/integrado

A técnica de resfriamento direto em dissipadores baseia-se na troca térmica do dissipador com meio externo através da circulação nas regiões internas de líquidos como água líquida, óleo e etilenoglicol (Sakanova et al., 2016). Esses líquidos são armazenados em reservatórios e refrigerados por radiadores.

Dissipadores com resfriamento direto apresentam melhor capacidade de redução da temperatura do sistema em relação ao resfriamento indireto em, aproximadamente, 30% (Morozumi et al., 2013). Esses modelos são encontrados em veículos elétricos como Nissan LEAF BEV, Tesla Model S e 2014 Honda Accord (Anwar et al., 2015b; Reimers et al., 2019; Moreno et al., 2016).

3.3 Resfriamento duplo

A técnica de resfriamento por dupla face possui distribuição uniforme nas duas faces do dispositivo de potência. Essa técnica apresenta redução expressiva da resistência térmica em relação aos modelos de resfriamento direto em, aproximadamente, 38% (Liang, 2015). O modelo de dupla face permite distribuição de temperatura ao longo da base

Tabela 2. Comparativo de soluções comerciais de sistemas de resfriamento (Jones-Jackson et al., 2022; Reimers et al., 2019).

Modelo	Método de resfriamento	Fluido	Semicondutor
2005 Honda Accord (Staunton et al., 2006)	Resfriamento indireto	WEG	Módulo IGBT
Lexus LS 600H (2008)(Bennion and Moreno, 2010)	Resfriamento duplo	WEG	Módulo IGBT
Nissan LEAF BEV (2012) (Anwar et al., 2015a)	Resfriamento direto com haletas usinadas	WEG para 65°C	Módulo IGBT
2014 Honda Accord (Moreno et al., 2016)	Resfriamento direto com haletas usinadas	WEG para 65°C	Módulo IGBT
Chevy Volt PHEV (2014)(Anwar et al., 2015b)	Resfriamento duplo	WEG para 75°C	Módulo IGBT
Tesla Model S (2015)(Reimers et al., 2019)	Resfriamento direto com cavidades	WEG	IGBT discreto
Audi A3 e-Tron PHEV (2016)(Investigators et al., 2020)	Resfriamento duplo	WEG para 75°C	Módulo IGBT
Toyota Prius HEV (2016) (Kitazawa et al., 2016)	Resfriamento duplo	WEG	Módulo IGBT
Cadillac CT6 PHEV (2016)(Anwar et al., 2016)	Resfriamento duplo	WEG para 75°C	Módulo IGBT

de alumínio, aumento da eficiência dos componentes eletrônicos e reduz picos de temperatura (Lee et al., 2020).

A primeira aplicação em sistemas de tração elétrica do modelo de resfriamento de dupla face é observada no inversor 2008 Lexus LS 600h, Chevy Volt PHEV (2014) e Cadillac CT6 PHEV (Bennion and Moreno, 2010; Anwar et al., 2015b, 2016). Burress and Campbell (2013) afirmam que a utilização dessa técnica de resfriamento podem reduzir entre os 15-35% os custos totais para construção do inversor, devido menor tamanho do sistema.

4. MODELO TÉRMICO EM FEA

A representação do modelo térmico em FEA permite que o dissipador seja estudado de maneira fragmentada, dividindo-o em finitas partes. Através dessa análise, pode-se determinar parâmetros do dissipador como impedância térmica que são utilizados para implementação da rede térmica de Foster. Além disso, obtém-se a temperatura do sistema, possibilitando estudo de diferentes topologias e comparação de desempenho das mesmas.

O presente trabalho realiza um estudo térmico em FEA da técnica de resfriamento direto por meio do *software* ANSYS. O sistema foi simulado com diferentes líquidos de resfriamento, tal como água, etilenoglicol e óleo em diferentes simulações. A escolha desta topologia de dissipador justifica-se pela simplicidade construtiva, reduzidos custos de construção em relação aos modelos de resfriamento dupla face e melhor eficiência em relação aos modelos de resfriamento indireto. Foi aplicado uma carga térmica sobre a superfície do dissipador a fim de simular o funcionamento real de um sistema de potência.

A metodologia de simulação adotada no *software* ANSYS para obtenção de parâmetros do dissipador como impedância térmica é obtido pela sequência de três passos, descritos a seguir:

- (1) Geometria: Construção da geometria em do dissipador pela extensão *space claim*;
- (2) Malha: Nessa etapa é realizada a definição das partes líquidas ou sólidas do sistema, escolha dos pontos de entrada e saída do líquido e geração das malhas do sistema;
- (3) Solução: Definição das condições de contorno do sistema e de operação. Nessa etapa, são definidos o critério de convergência para as iterações dos balanço de energia do sistema térmico, velocidade e pressão do líquido, temperatura ambiente e carga térmica dissipada pelo SiC MOSFET.

Os passos adotados para simulação FEA no *software* ANSYS são esquematizados na Figura 4:

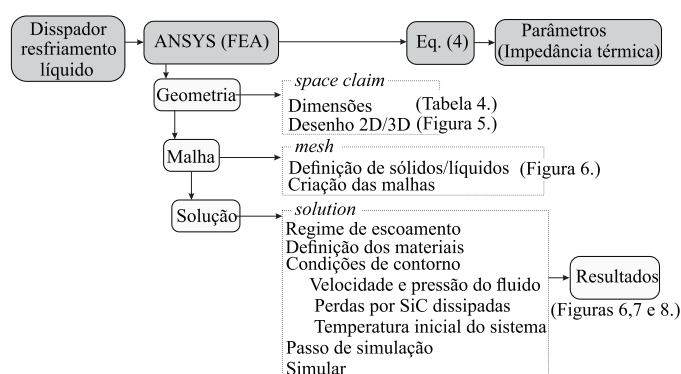


Figura 4. Metodologia de simulação FEA no *software* ANSYS.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros e condições de contorno da simulação.

Tabela 3. Parâmetros e condições de contorno da simulação ANSYS.

Parâmetros	Unidade	Valores
Dimensões (L x C x P)	mm	250x60x30
Diâmetro do canal	mm	9,525
Temperatura inicial do líquido	°C	65
Temperatura inicial do ambiente	°C	65
Vazão do líquido	L/Min	0,133
Fluxo de calor	W · 10 ³ /m ² · K	40 – 160
Material	Condutividade	Valor
Pasta térmica	W/m · K	9
Alumínio	W/m · K	202,4
Água	W/m · K	0,6
Óleo	W/m · K	0,12
Etilenoglicol	W/m · K	0,252

As Figura 5 e 6 apresentam a topologia do dissipador escolhido e a malha formada pelo *software* ANSYS.

A simulação realizada tem como objetivo analisar o desempenho da topologia e possibilitar a obtenção as impedâncias térmicas. Uma carga térmica foi distribuída sobre a superfície superior do dissipador que representa a potência dissipada pelos transistores de potência. A estratégia de simulação baseia-se no aumento do fluxo de calor por SiC MOSFET, que representa a potência dissipada. Os valores utilizados foram organizados em degraus de potência dissipada de 100, 200, 300 e 400 W. A potência do módulo SiC é inserida no *software* ANSYS através do fluxo de calor respectivo ao valor das perdas por módulo, conforme

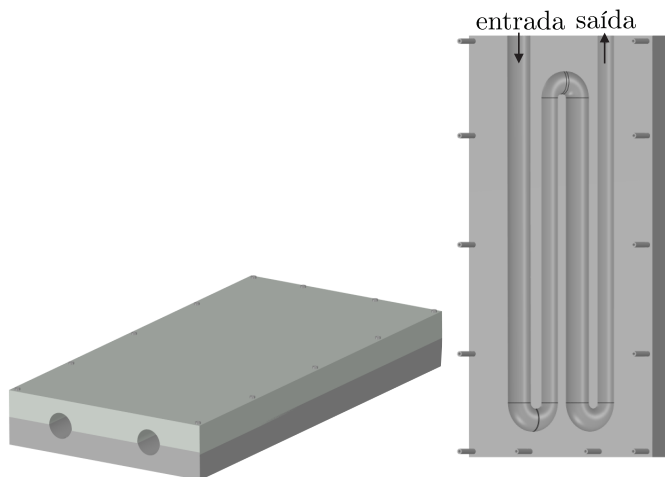


Figura 5. Geometria do dissipador.

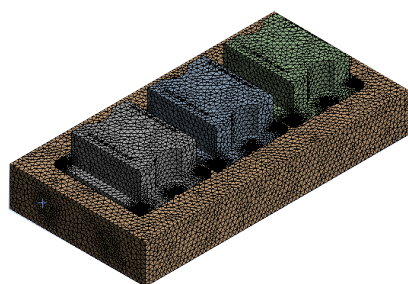


Figura 6. Malha do dissipador

a equação 6 e os valores de fluxo de calor são apresentados na Tabela 3.

O perfil de temperatura do dissipador são apresentados nas Figuras 7, 8 e 9.

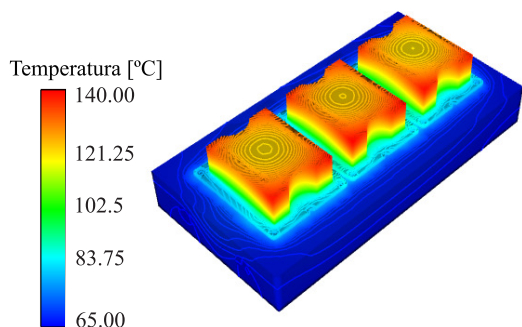


Figura 7. Perfil de temperatura do dissipador utilizando fluido água líquida.

4.1 Descrição dos resultados em FEA

O valor da temperatura dos módulos SiC, dissipador e fluido em relação ao aumento das perdas são apresentadas nas Figuras 10, 11 e 12.

A variação das perdas por módulo de SiC possibilitam a análise da capacidade de resfriamento do dissipador de calor para cada tipo de líquido. O óleo apresentou entre todos os casos maior variação de temperatura. Nesse cenário, a temperatura de junção obteve magnitude que impossibilita a operação do módulo SiC, embora a temperatura do

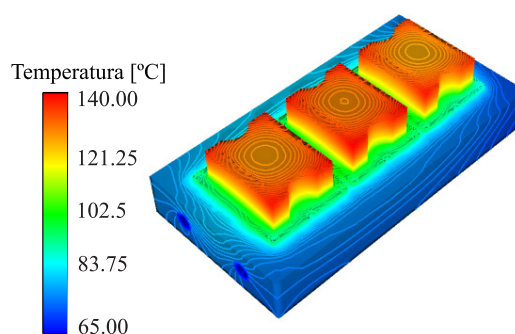


Figura 8. Perfil de temperatura do dissipador utilizando fluido etilenoglicol.

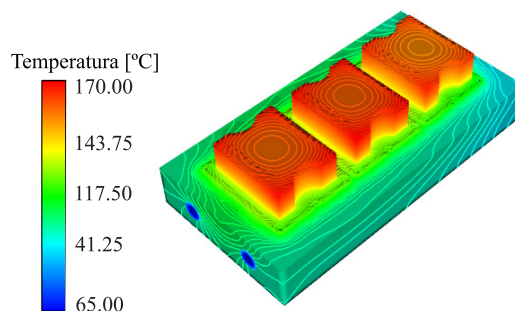


Figura 9. Perfil de temperatura do dissipador utilizando óleo.

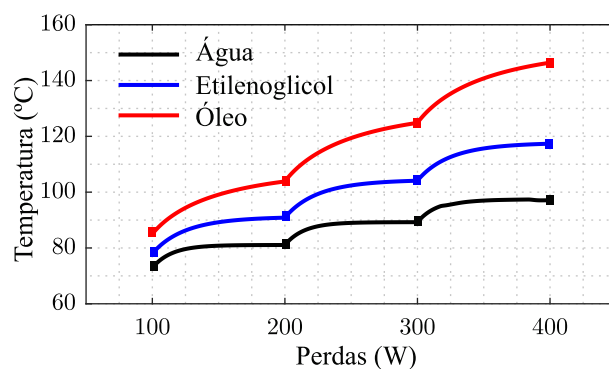


Figura 10. Temperatura da junção do módulo SiC com aumento das perdas.

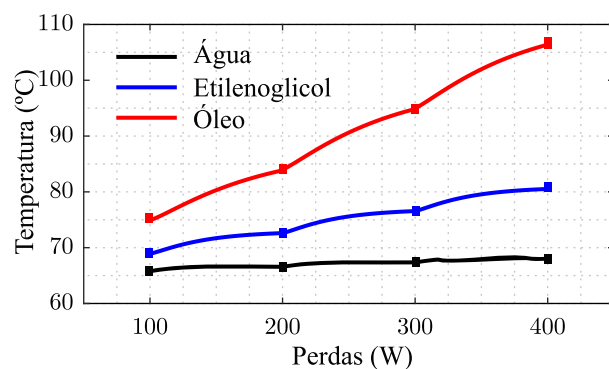


Figura 11. Temperatura do dissipador do módulo SiC com aumento das perdas.

dissipador de calor e do fluido não tenham variado da mesma forma que a temperatura do módulo.

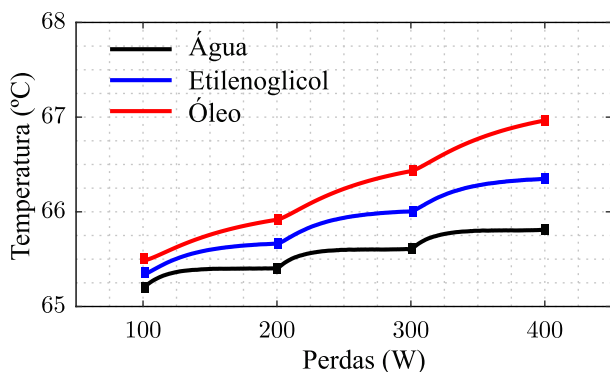


Figura 12. Temperatura do líquido de resfriamento com aumento das perdas.

O Etilenoglicol e a água líquida apresentaram níveis de aquecimento da junção do módulo SiC e dissipador superiores ao óleo líquido. A utilização de água como líquido de resfriamento apresenta capacidade de redução de temperatura em comparação ao etilenoglicol. A partir dos resultados mostra-se que o aumento da carga térmica eleva de forma gradativa a temperatura do líquido. Nota-se que com perdas acima de 400 W comprometem o resfriamento do sistema, visto que o óleo apresenta capacidade de troca térmica inferior aos demais líquidos e a água atinge ebulição aos 100°C, enquanto o etilenoglicol alcança esse ponto aos 197°C.

4.2 Impedância térmica do dissipador

As curvas utilizadas para determinar a impedância térmica do dissipador de calor são resultados da simulação FEA, apresentadas na Figura 4, e são obtidas através da diferença entre o aquecimento e o inverso da curva de resfriamento dividido pelas perdas para cada módulo SiC. Nessa simulação de aquecimento e resfriamento, as condições de contorno da Tabela 3 foram mantidas. No entanto, foi adotado como líquido de resfriamento o etilenoglicol devido a capacidade de operar com elevadas cargas térmicas em função do elevado ponto de ebulição. A Figura 13 mostra o processo de aquecimento e resfriamento para uma perda de 400W por módulo do inversor trifásico, útil para determinar a impedância térmica do dissipador. Os parâmetros de impedância térmica e constante de tempo obtidos são $R_{th} = [0.010858, 0.031108]\Omega$ e $t_{th} = [0.010858, 0.031108]s$, respectivamente.

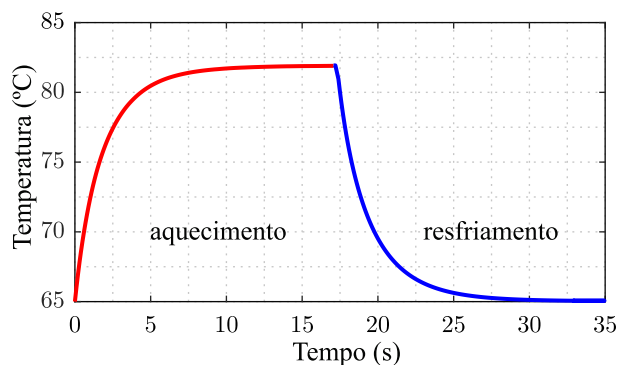


Figura 13. Aquecimento e resfriamento do dissipador.

5. VALIDAÇÃO DO SISTEMA TÉRMICO

O sistema de troca térmica é avaliado a partir da capacidade de resfriamento do dissipador de calor com refrigeração líquida. A validação do sistema térmico é modelado a partir dos parâmetros do dissipador e SiC MOSFET obtidos em ANSYS e *datasheet* comercial, respectivamente. Os parâmetros obtidos da chave e dissipador com resfriamento líquido são implementados no *software* Typhoon Hil, utilizando a rede térmica de Foster para contabilizar a temperatura do sistema através da Eq. (4). A utilização do Typhoon Hil permite realizar testes de simulações em tempo real. Além disso, o mesmo possibilita avaliar a capacidade de troca térmica independente da geometria do dissipador.

5.1 Simulação em Typhoon Hil

O inversor trifásico opera com frequência de chaveamento de 100 kHz com tensão do barramento de 400 V que alimenta uma carga RL de 50 kW com fator de potência de 0,9. A rede Foster é implementada através da impedância térmica do dissipador de calor obtida em ANSYS, obtidos na subseção 4.2. A Figura 14 mostra a estrutura de simulação da carga RL e rede térmica:

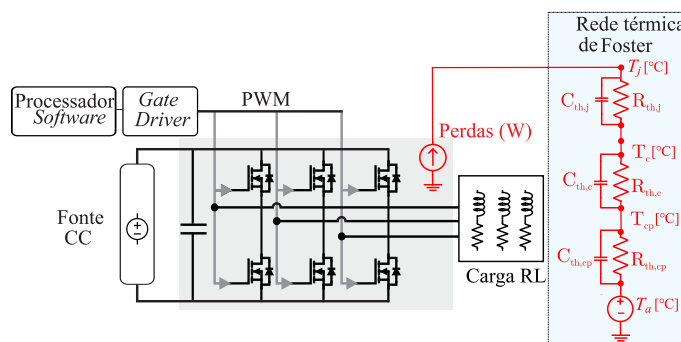


Figura 14. Estrutura de simulação inversor trifásico com carga RL e rede térmica de Foster.

Nesse processo, as perdas do inversor trifásico são computadas e o produto pela impedância térmica do dissipador resulta na temperatura do mesmo. O dissipador, nesse caso, é tratado como base de alumínio e líquido de resfriamento, visto que a impedância é determinada a partir do sistema completo do dissipador com as condições de contorno apresentadas na Tabela 3.

5.2 Resultados

Os resultados representam a aplicação do degrau de carga por fase de 7,5 kW para 15 kW no inversor trifásico para 50 kW e os efeitos térmicos causados na temperatura da junção e do dissipador de calor devido ao aumento de perdas da carga RL. A Figura 15 a potência e perdas por chave e a Figura 16 apresenta a temperatura da junção e dissipador:

A implementação da rede térmica no *software* Typhoon Hil permitiu a validação do dissipador com resfriamento líquido. A temperatura inicial do dissipador é 65 °C enquanto o SiC MOSFET em 95 °C. Isso ocorre devido ao

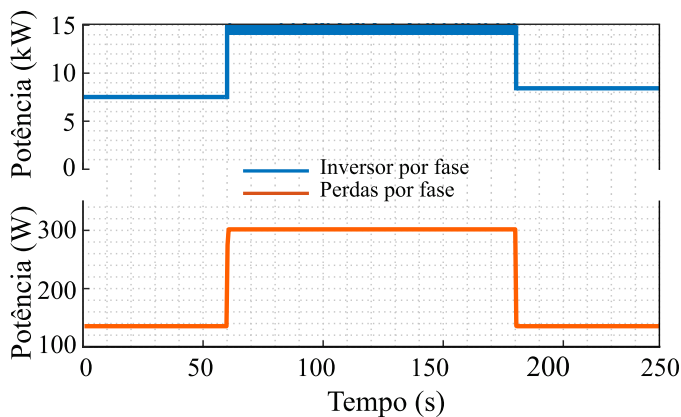


Figura 15. Potência e perdas do inversor trifásico por fase.

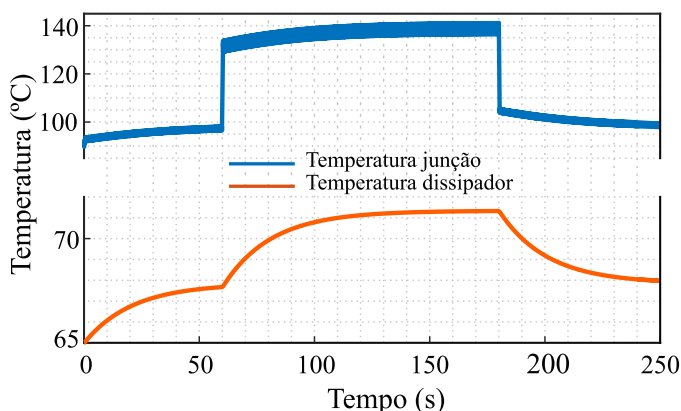


Figura 16. Temperatura da junção e do dissipador.

tamanho da chave em relação a elevada carga térmica dissipada. O SiC MOSFET obteve aumento da temperatura de, aproximadamente, 35% em relação ao valor inicial após o degrau da carga RL. O dissipador com resfriamento líquido, por sua vez, mitigou o excesso de carga térmica sobre a junção do SiC MOSFET através do aumento da temperatura interna da base de alumínio e troca térmica com o meio externo.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o dissipador de calor de refrigeração líquida. Foi realizado um estudo das perdas e simulações em ANSYS para determinar a impedância térmica dos SiC MOSFETs e dissipadores com resfriamento líquido utilizando FEA. A simulação em ANSYS foi responsável por determinar líquido de resfriamento adequado para validação do sistema e impedância térmica do sistema. Os parâmetros de impedância térmica foram implementados no *software* Typhoon Hil através da rede térmica de Foster. Tonou-se possível, dessa forma, avaliar a capacidade de resfriamento para diferentes cargas conectadas ao inversor trifásico. O dissipador foi avaliado para uma carga RL de 50 kW conectada ao inversor trifásico e operou com temperaturas dentro da faixa de operação sem a presença de picos de temperatura. Além disso, a implementação do sistema térmico em Typhoon Hil permitiu a conexão de diferentes tipos de cargas com diferentes magnitudes de perdas, tornando possível avaliar a eficiência de dissipadores com resfriamento líquido

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Finanças 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq e Fundação para o Desenvolvimento da Pesquisa-Fundep Rota 2030/Linha V 27192.03.01/2020.12-00.

REFERÊNCIAS

- Anwar, M., Hayes, M., Tata, A., Teimorzadeh, M., and Achatz, T. (2015a). Power dense and robust traction power inverter for the second-generation chevrolet volt extended-range ev. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 4, 145–152. doi:10.4271/2015-01-1201.
- Anwar, M., Hayes, M., Tata, A., Teimorzadeh, M., and Achatz, T. (2015b). Power dense and robust traction power inverter for the second-generation chevrolet volt extended-range ev. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 4(1).
- Anwar, M., Teimor, M., Savagian, P., Saito, R., and Matsuo, T. (2016). Compact and high power inverter for the cadillac ct6 rear wheel drive phev. In *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 1–7. IEEE.
- Bahman, A.S., Ma, K., and Blaabjerg, F. (2016). General 3d lumped thermal model with various boundary conditions for high power igbt modules. 261–268.
- Bennion, K. and Moreno, G. (2010). Thermal management of power semiconductor packages-matching cooling technologies with packaging technologies (presentation). Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Burruss, T. and Campbell, S. (2013). Benchmarking ev and hev power electronics and electric machines. doi: 10.1109/ITEC.2013.6574498.
- Chen, W., Zhang, L., Pattipati, K., Bazzi, A.M., Joshi, S., and Dede, E.M. (2020). Data-driven approach for fault prognosis of sic mosfets. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(4), 4048–4062. doi:10.1109/TPEL.2019.2936850.
- Han, F., Guo, H., and Ding, X. (2021). Design and optimization of a liquid cooled heat sink for a motor inverter in electric vehicles. *Applied Energy*, 291, 116819.
- Imran, A.A., Mahmoud, N.S., and Jaffal, H.M. (2018). Numerical and experimental investigation of heat transfer in liquid cooling serpentine mini-channel heat sink with different new configuration models. *Thermal Science and Engineering Progress*, 6, 128–139.
- Investigators, P., Steier, A., Munday, A., Ramamurthy, D.T.W.S., Karwa, J.S.S.F.P.B.M., and Zaklan, N. (2020). Advanced strong hybrid and plug-in hybrid engineering evaluation and cost analysis carb agreement 15car018.
- Jones-Jackson, S., Rodriguez, R., Yang, Y., Lopera, L., and Emadi, A. (2022). Overview of current thermal management of automotive power electronics for traction purposes and future directions. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
- Ki, S., Lee, J., Ryu, S., Bang, S., Kim, K., and Nam, Y. (2021). A bio-inspired, low pressure drop liquid cooling

- system for high-power igbt modules for ev/hev applications. *International Journal of Thermal Sciences*, 161, 106708.
- Kitazawa, O., Kikuchi, T., Nakashima, M., Tomita, Y., Kosugi, H., and Kaneko, T. (2016). Development of power control unit for compact-class vehicle. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 5, 278–285. doi:10.4271/2016-01-1227.
- Lee, H., Smet, V., and Tummala, R. (2020). A review of sic power module packaging technologies: Challenges, advances, and emerging issues. doi:10.1109/JESTPE.2019.2951801.
- Liang, Z. (2015). Integrated double sided cooling packaging of planar sic power modules. 4907–4912. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/ECCE.2015.7310352.
- Mademlis, G., Orbay, R., Liu, Y., Sharma, N., Arvidsson, R., and Thiringer, T. (2021). Multidisciplinary cooling design tool for electric vehicle sic inverters utilizing transient 3d-cfd computations. *eTransportation*, 7, 100092.
- Moreno, G., Bennion, K., King, C., and Narumanchi, S. (2016). Evaluation of performance and opportunities for improvements in automotive power electronics systems. 185–192. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/ITHERM.2016.7517548.
- Morozumi, A., Hokazono, H., Nishimura, Y., Ikeda, Y., Nabetani, Y., and Takahashi, Y. (2013). Direct liquid cooling module with high reliability solder joining technology for automotive applications. In *2013 25th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD)*, 109–112. IEEE.
- Nawawi, A., Tong, C.F., Yin, S., Sakanova, A., Liu, Y., Liu, Y., Kai, M., See, K.Y., Tseng, K.J., Simanjorang, R., et al. (2016). Design and demonstration of high power density inverter for aircraft applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(2), 1168–1176.
- Nemeth, T., Bubert, A., Becker, J.N., De Doncker, R.W., and Sauer, D.U. (2018). A simulation platform for optimization of electric vehicles with modular drive-train topologies. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(4), 888–900. doi:10.1109/TTE.2018.2869371.
- Reimers, J., Dorn-Gomba, L., Mak, C., and Emadi, A. (2019). Automotive traction inverters: Current status and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3337–3350.
- Sakanova, A., Tong, C.F., Nawawi, A., Simanjorang, R., Tseng, K., and Gupta, A. (2016). Investigation on weight consideration of liquid coolant system for power electronics converter in future aircraft. *Applied Thermal Engineering*, 104, 603–615.
- Soltau, N., Wiesner, E., Stumpf, E., Idaka, S., and Hatori, K. (2020). Electric-energy savings using 3.3 kv full-sic power-modules in traction applications. In *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 1–5. doi:10.1109/EVER48776.2020.9242996.
- Staunton, R.H., Burrell, T.A., and Marlino, L.D. (2006). Evaluation of 2005 honda accord hybrid electric drive system. Technical report, Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- Yu, S., Wang, J., Zhang, X., Liu, Y., Jiang, N., and Wang, W. (2021). The potential impact of using traction inverters with sic mosfets for electric buses. *IEEE Access*, 9, 51561–51572.
- Zhang, C., Srdic, S., Lukic, S., Kang, Y., Choi, E., and Tafti, E. (2018). A sic-based 100 kw high-power-density (34 kw/l) electric vehicle traction inverter. In *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 3880–3885. IEEE.