

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA

DANIEL GURGEL SOUZA MEDEIROS

ANÁLISE DE SISTEMAS DE CONTROLE DE TEMPERATURA EMBARCADOS

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

DANIEL GURGEL SOUZA MEDEIROS

ANÁLISE DE SISTEMAS DE CONTROLE DE TEMPERATURA EMBARCADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” como requisito para obtenção
de título de Bacharel em Engenharia
Aeronáutica

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Maria Cardoso

This work is licensed under the Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional License.

To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2023

M488a	Medeiros, Daniel Gurgel Souza Análise de sistemas de controle de temperatura embarcados / Daniel Gurgel Souza Medeiros. -- São João da Boa Vista, 2023 33 p. : il., tabs. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista Orientadora: Elaine Maria Cardoso 1. Aeronaves. 2. Carga térmica. 3. Resfriamento. 4. Calor Transmissão. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE SISTEMAS DE CONTROLE DE TEMPERATURA EMBARCADOS

Aluno: Daniel Gurgel Souza Medeiros
Orientadora: Profa. Dra. Elaine Maria Cardoso

Banca Examinadora:

- Elaine Maria Cardoso (Orientadora)
- Alex Pereira da Cunha (Examinador)
- Igor Seicho Kiyomura (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Processo nº 057/2023)

São João da Boa Vista, 04 de setembro de 2023

RESUMO

O gerenciamento térmico é um aspecto crítico do projeto e da operação da aeronave, garantindo desempenho e confiabilidade dos sistemas e componentes a bordo. Este trabalho apresenta uma análise de diferentes tecnologias eficazes de sistemas de gerenciamento térmico empregadas em aeronaves. O estudo visa fornecer uma compreensão dos pontos fortes, limitações e aplicações, auxiliando na seleção das soluções mais adequadas para diferentes configurações de aeronaves e perfis de missão. Cada tecnologia é examinada em termos de seus princípios operacionais, capacidades de dissipação de calor e desempenho térmico. Para apoiar a análise, são apresentados estudos e exemplos de implementações das diferentes tecnologias, destacando seu impacto no desempenho térmico. Ao final as vantagens e desvantagens de cada tecnologia são mostradas, levando em consideração fatores como capacidade de dissipação de calor, controle de temperatura, limitações de peso e confiabilidade. Este estudo contribui para o conhecimento existente sobre gerenciamento térmico de aeronaves, fornecendo aos projetistas, engenheiros e operadores de aeronaves informações sobre a seleção e implementação de tecnologias de sistemas de gerenciamento térmico. Ao avaliar os pontos fortes e as limitações de cada tecnologia, o projeto e o desenvolvimento de sistemas de gerenciamento térmico em aeronaves modernas é otimizado, melhorando o desempenho e a confiabilidade geral da aeronave.

Palavras-chave: sistemas de gerenciamento térmico; aeronaves; métodos passivos; métodos ativos; análise comparativa.

ABSTRACT

Thermal management is a critical aspect of aircraft design and operation, ensuring the performance and reliability of onboard systems and components. This work analyzes different effective technologies of thermal management systems used in aircraft. The study aims to understand strengths, limitations and applications, assisting in selecting the most suitable solutions for different aircraft configurations and mission profiles. Each technology is examined in terms of its operating principles, heat dissipation capabilities and thermal performance. Studies and examples of different technologies are presented to support the analysis, highlighting their impact on thermal performance. In the end, the advantages and disadvantages of each technology are shown, taking into account factors such as heat dissipation capacity, temperature control, weight limitations and reliability. This study contributes to knowledge on aircraft thermal management by providing aircraft designers, engineers, and operators with information on the selection and implementation of thermal management system technologies. By evaluating each technology's strengths and limitations, the design and development of thermal management systems in modern aircraft are optimized, improving overall aircraft performance and reliability.

Keywords: thermal management systems; aircraft; passive methods; active methods; comparative analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Tecnologias de gerenciamento térmico aplicáveis a dispositivos eletrônicos em automóveis e aeronaves.....	12
Figura 2 — Variações de arranjos da refrigeração a ar, mostrando as diferenças na refrigeração forçada e passiva.	13
Figura 3 — Desenho esquemático de um sistema que opera por contato indireto.	14
Figura 4 — Imagem do processo de resfriamento por spray.....	19
Figura 5 — Desenho esquemático dos processos envolvidos no resfriamento por <i>spray</i> . ..	20
Figura 6 — Termossifão e seu princípio de funcionamento.....	21
Figura 7 — Sistema de gerenciamento térmico com base em LHP.....	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Comparação de tecnologias de gerenciamento térmico para eletrônicos a bordo de automóveis e aeronaves.	25
Tabela 2 — Demonstração da posição relativa de cada tecnologia de resfriamento de bateria.	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
ECU	<i>Engine Control Unit</i>
IGBTs	<i>Insulated-gate bipolar resistor</i>
LHP	<i>Looping Heat Pipes</i>
MEA	<i>More eletric aircraft</i>
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MOSFET	<i>Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor</i>
PCMs	Phase change materials
PCU	<i>Power control unit</i>
PHPs	Pulse heat pipes
TEC	<i>Thermal electric cooling</i>
TGA	<i>Termogravimetry Analysis</i>
VCIs	Veículos de combustão interna
VEHs	Veículos elétricos híbridos
VEs	Veículos elétricos
WBG	<i>Wide-bandgap semiconductor</i>
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	100
2. MÉTODOS ATIVOS.....	122
2.1 Resfriamento forçado a ar	122
2.2 Resfriamento por contato indireto	144
2.2.1 Resfriamento indireto monofásico	155
2.2.2 Resfriamento indireto bifásico	166
2.3 Resfriamento por contato direto	177
2.4 Resfriamento por jato colidente (<i>jet impingement</i>)	188
2.5 Resfriamento por <i>spray</i>	19
3. MÉTODOS PASSIVOS	200
3.1 Tubos de calor	200
3.2 Materiais de mudança de fase (PCMs)	233
4. COMENTÁRIOS FINAIS	244
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	288

1.INTRODUÇÃO

Atualmente, as altas preocupações relativas ao impacto ambiental causado pela emissão de gases geradores do efeito estufa estimularam o desenvolvimento de pesquisas em energias renováveis. Como resultado, as indústrias automotivas vêm apresentando significativas evoluções na transição de veículos a combustão interna (VCIs) para veículos elétricos (VEs), passando inclusive pela fase intermediária, os veículos elétricos híbridos (VEHs) [1]. No que diz respeito aos veículos a combustão e híbridos, grandes esforços vêm sendo implementados no sentido de melhorar a eficiência do motor e a economia de combustível através da introdução de componentes de eletrificação em substituição aos tradicionais componentes mecânicos. No entanto, a justaposição do motor, da unidade de controle e da transmissão aumentará consideravelmente a temperatura dos eletrônicos para acima de 125 °C. De acordo com um resumo dos requisitos eletrônicos automotivos, a temperatura para a maior parte da cavidade sob o capô pode exceder 150 °C [2].

No que diz respeito aos veículos elétricos, a grande quantidade de calor dissipada do motor ou do motor de tração elétrica de alta potência e outros dispositivos também gerará um ambiente de alta temperatura. Na última década, o mercado de VEs impulsionou o mercado de módulos de eletrônica de potência de alto fluxo de calor. A eletrônica de potência típica nesses módulos, como diodos, transistores de efeito de campo (MOSFETs) e transistores de efeito de campo bipolar (IGBTs), operam em um ambiente de alta temperatura [3]. As temperaturas de junção desses eletrônicos costumam operar até 15 °C acima da temperatura ambiente. Além disso, esse valor pode chegar até a 25 °C para dispositivos de potência. Como resultado, os componentes eletrônicos sob o capô dos veículos, especialmente aqueles próximos ao motor, sofrem com temperaturas de trabalho superiores a 175 °C, ameaçando severamente a confiabilidade e a vida útil desses componentes eletrônicos [4].

Para resolver esse problema, várias medidas foram propostas, como o aumento da área da matriz de silício do dispositivo, aplicando um dispositivo feito de materiais semicondutores de banda larga, como SiC (carboneto de silício) e GaN (nitreto de gálio), que são capazes de operar de 175 a 200 °C [5-9]; porém, o custo ainda é elevado para uso comercial. Nesse sentido, é crucial projetar um sistema de gerenciamento térmico econômico com segurança e confiabilidade. Enquanto isso, os requisitos de temperatura e o custo total dos módulos eletrônicos podem ser aparentemente reduzidos ao fornecer

gerenciamento térmico eficaz [10]. Em suma, a aplicação de estratégias eficazes de gerenciamento térmico pode melhorar a confiabilidade do sistema e reduzir o estresse térmico.

As tendências de desenvolvimento de dispositivos elétricos automotivos favorecem tamanhos menores acompanhados de melhor desempenho, o que aumentará as taxas de geração de calor, levando a requisitos mais rigorosos de técnicas de gerenciamento térmico [11].

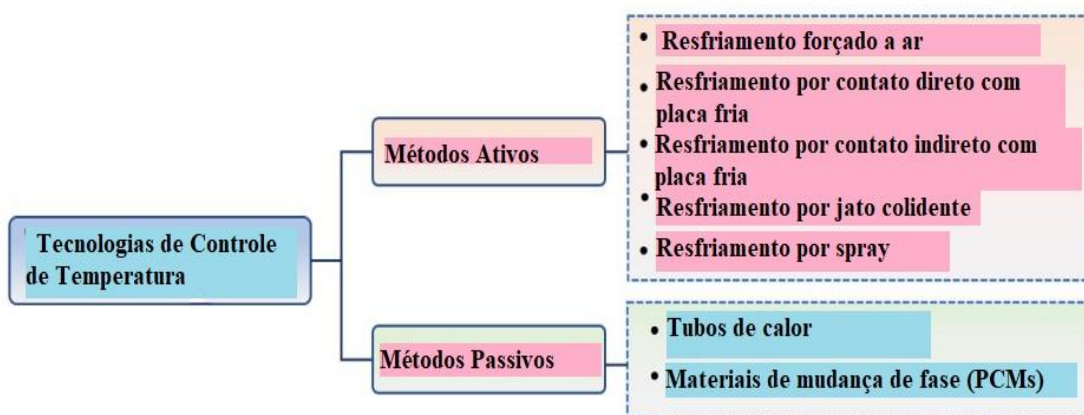
Muito semelhante à indústria automotiva, a indústria da aviação também enfrenta desafios para fornecer gerenciamento térmico confiável em um ambiente hostil. A fim de minimizar o comprimento da fiação de atuadores e sensores, a ECU (*Engine Control Unit* – Unidade de Controle do Motor) de um motor aeronáutico é normalmente montada na carcaça do motor. Como resultado, a ECU será exposta a um ambiente de alta temperatura e alta vibração. Por outro lado, *More Electric Aircraft* (MEA, em inglês) ou Aeronave Mais Elétrica também estão sendo desenvolvidas em resposta à redução da emissão global de CO₂ [12,13]. Importante mencionar que o requisito de energia pode ser reduzido e menor queima de combustível e emissões de CO₂ pode ser alcançada pelo desenvolvimento de MEA [14]. No entanto, em comparação com os automóveis, o que torna o gerenciamento térmico da eletrônica a bordo das aeronaves mais complicado é que os dissipadores de calor da aeronave são limitados [15].

Com base na discussão acima, pode-se constatar que as preocupações de gerenciamento térmico para automóveis e aeronaves apresentam alta similaridade em termos de eletrônica implementada e as restrições típicas de projeto impostas em um ambiente operacional hostil. Assim, as tecnologias de gerenciamento térmico usadas nesses dois campos são discutidas em conjunto. Observe que o gerenciamento térmico de uma aeronave é muito mais sensível à massa e ao volume do sistema; na verdade, é considerado um desafio para o projeto avançado de aeronaves.

Para fornecer gerenciamento térmico confiável e eficaz para eletrônicos usados em automóveis e aeronaves, os cientistas propuseram várias estratégias nas últimas décadas, incluindo resfriamento forçado de ar, resfriamento forçado de líquido, jatos incidentes, resfriamento por *spray* e assim por diante [16]. Além disso, algumas outras técnicas, como tubos de calor, resfriadores termoeletrônicos e materiais de mudança de fase (PCMs), também são adotadas no gerenciamento térmico. As tecnologias de gerenciamento térmico para dispositivos eletrônicos em automóveis e aeronaves são sistematicamente revisadas conforme o esboço mostrado na Figura 1. Além disso, as características estruturais,

desempenho térmico e tendência de desenvolvimento das tecnologias de gerenciamento térmico ativo e passivo são apresentados.

Figura 1 — Tecnologias de gerenciamento térmico aplicáveis a dispositivos eletrônicos em automóveis e aeronaves.



Fonte: Próprio autor.

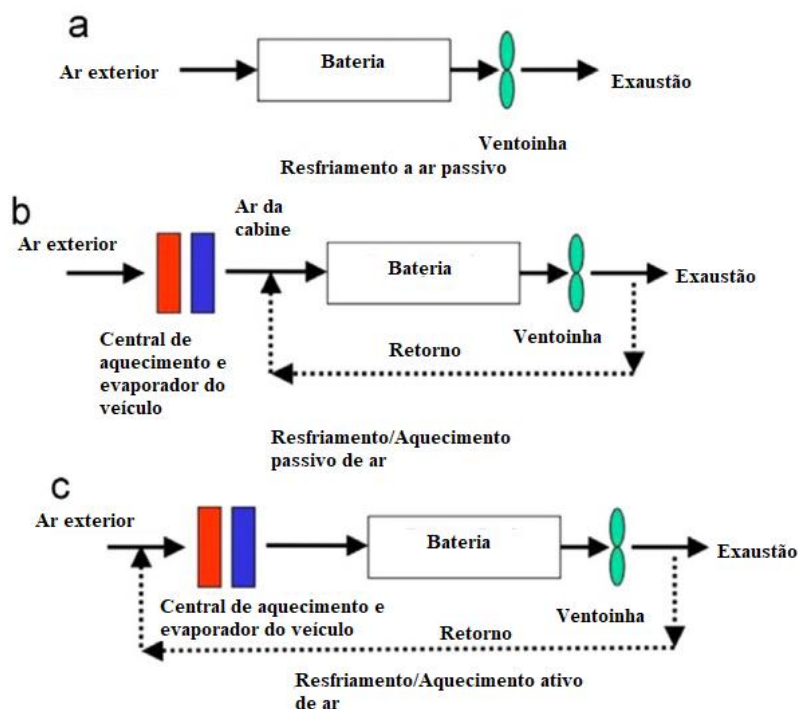
2. MÉTODOS ATIVOS

2.1 Resfriamento forçado a ar

O uso direto de ar para resfriamento apresenta algumas vantagens em melhorar a compactidade e reduzir a complexidade e o custo por meio da eliminação de um circuito de resfriamento adicional e de muitos componentes volumosos. Assim, o resfriamento forçado a ar permanece competitivo para gerenciamento térmico. Nos últimos anos, o surgimento de semicondutores WBG, como o SiC, que são capazes de operar em temperaturas mais altas, tornaram a tecnologia de resfriamento por ar forçado promissora sem sacrificar o desempenho [17]. Como resultado, os veículos elétricos híbridos comerciais têm sido equipados com inversores refrigerados a ar, fazendo com que muitos engenheiros foquem no desenvolvimento de veículos refrigerados a ar usando semicondutores WBG.

Na Figura 2 é possível observar a diferença existente entre a refrigeração a ar passiva (caso a) e ativa (caso b e c); o qual consiste na injeção de energia externa para o funcionamento do ciclo de trabalho.

Figura 2 — Variações de arranjos da refrigeração a ar, mostrando as diferenças na refrigeração forçada e passiva.



Fonte: Adaptado de [18].

Mesmo com a baixa condutividade típica, esta técnica continua sendo utilizado nos estudos mais recentes. Nos primeiros anos da década de 2010, o estudo da utilização do resfriamento a ar nos sistemas de controle de temperatura se concentrou na otimização do arranjo do sistema de baterias, taxa de fluxo de ar e caminho de fluxo [18]. A posição da entrada e da saída de ar, bem como sua velocidade, afetam a capacidade de resfriamento do sistema, tendo boa parte das pesquisas nessa área explorado esses fatores. Velocidades mais altas podem reduzir o tempo requerido para que o sistema atinja o estado estacionário e minimizar o sobreaquecimento, diminuindo assim os riscos incutidos, como o que ocorre em baterias e células de combustível [19]. A circulação forçada de ar é mais eficiente devido aos melhores coeficientes de transferência de calor, mas pode comprometer o ganho elétrico, devido aos gastos energéticos para manter o funcionamento dos exaustores [20].

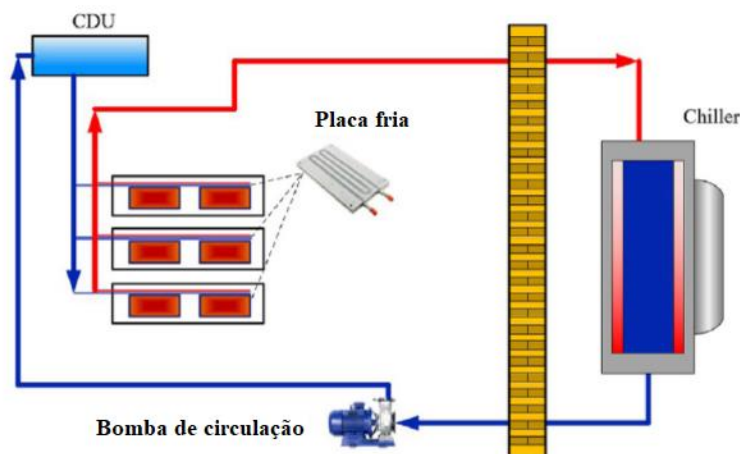
Liu et al. [21] projetaram um inversor SiC baseado em um módulo de potência de empacotamento 3D altamente integrado. Simulações numéricas foram realizadas para otimizar o diâmetro e a distribuição das entradas e saídas de um dissipador de calor. Os resultados mostraram que o dissipador de calor com 36 orifícios de 5 mm diâmetro mostrou o melhor desempenho térmico. Quando comparado com o projeto básico, uma

redução de volume de 37,5% e uma distribuição de temperatura muito mais uniforme pode ser obtida usando o dissipador de calor refrigerado a ar forçado. Recentemente, Zeng et al. [22] propuseram uma metodologia de projeto para projetar um inversor de SiC refrigerado a ar forçado. A viabilidade do inversor de SiC refrigerado a ar proposto foi demonstrada por meio de teste experimental em um protótipo. Os resultados indicaram que o inversor SiC proposto pode melhorar notavelmente a densidade de potência da PCU (*Power Control Unit* – Unidade de Controle de Potência) e eliminar o complicado sistema de refrigeração por líquido.

2.2 Resfriamento por contato indireto

Devido à inadequada capacidade de resfriamento da técnica de resfriamento forçado a ar e às restrições do fluido de trabalho em automóveis e aeronaves, o resfriamento forçado a líquido tem sido o método mais comumente adotado [23,24]. Em geral, o resfriamento forçado de líquido pode ser dividido em duas categorias, a saber, resfriamento de contato indireto e resfriamento de contato direto. No primeiro tipo, o calor gerado é transferido para um meio sólido denominado placa fria (*cold plate*), onde ocorre o escoamento de líquido (Figura 3). Em contraste, no resfriamento por contato direto, a fonte de calor e o dissipador de calor são integrados em um componente; e o fluido refrigerante absorve o calor através do contato direto com o módulo de potência. Portanto, os materiais extras de interface térmica são eliminados, diminuindo a resistência térmica e, conseqüentemente, melhorando a eficiência da transferência de calor.

Figura 3 — Desenho esquemático de um sistema que opera por contato indireto.



Fonte: Adaptado de [24].

Parâmetros geométricos como a razão de aspecto e o diâmetro hidráulico afetam significativamente a transferência de calor e a queda de pressão em regiões laminares e de transição [25]. A queda de pressão em micro canais foi documentada ao aumentar em 35% com a diminuição do diâmetro hidráulico. Ademais, trocadores de calor com o interior corrugado tem amplas aplicações, incluindo estações de energia, motores aeronáuticos e em equipamentos embarcados em navios, devido aos seus altos coeficientes térmicos [25].

2.2.1 Resfriamento indireto monofásico

Uma vez que a capacidade de dissipação de calor da placa fria é fortemente dependente da configuração do canal da placa fria, diferentes estruturas de canal foram desenvolvidas para melhorar o desempenho térmico nas últimas décadas [26,27]. Em geral, a mistura de água-etileno glicol é usada como fluido refrigerante no sistema de refrigeração em automóveis, enquanto o combustível e a polialfaolefina são geralmente adotados nos circuitos de refrigeração de aeronaves.

Na comunidade automotiva, ao realizar o projeto térmico os engenheiros geralmente adotam uma placa fria disponível comercialmente de acordo com critérios de seleção específicos. Como resultado, geralmente existe superdimensionamento e/ou incompatibilidade entre a carga térmica dos módulos de potência e a capacidade de refrigeração.

Nas últimas décadas, as placas frias com micro/minicanal e estrutura de micropilares têm atraído grande interesse de pesquisa por causa de sua alta eficiência de transferência de calor e tamanho compacto. Becker et al. [28] realizaram uma otimização térmica de uma placa fria incluindo aletas piniformes, e os resultados demonstraram uma distribuição de temperatura muito mais uniforme. Gurpinar et al. [29] adotaram uma placa fria com microcanal múltiplo para gerenciamento térmico de SiC MOSFETs para VEs. Essa placa fria foi colocada entre as duas fontes de calor. Essa estratégia de resfriamento com uma estrutura em sanduíche forneceu um bom equilíbrio entre a capacidade do módulo e os requisitos específicos de resfriamento.

O peso total e o volume dos componentes devem ser considerados durante a fase de projeto do sistema de gerenciamento térmico em aeronaves devido à sua contribuição para o aumento do custo operacional da aeronave. Comumente, o combustível é considerado o dissipador de calor mais básico e importante, mesmo para as aeronaves avançadas, como o F-22 [30]. Raske et al. [31] realizaram uma otimização topológica sobre uma placa fria

para o gerenciamento térmico de dispositivos elétricos em aeronaves. Os resultados indicaram que a temperatura de pico para o caso otimizado foi 4 °C menor e houve uma redução de massa de 38,5%.

Wang et al. [32] propuseram um projeto de sistema de resfriamento híbrido, que combinou resfriamento líquido de placa fria e um dispositivo TEC (resfriamento termoelétrico) para resfriamento de um inversor VEH. Os resultados indicaram que esse esquema de resfriamento híbrido poderia melhorar substancialmente a uniformidade de temperatura dos *chips*. A este respeito, uma distribuição de temperatura não uniforme geralmente se apresenta na superfície ao implementar somente o método de resfriamento indireto monofásico. Do ponto de vista do projeto elétrico e da confiabilidade do dispositivo, é altamente desejável manter a temperatura da superfície dos dispositivos o mais uniforme possível. Nesse sentido, a combinação de placas frias com outras técnicas de gerenciamento térmico pode alcançar um desempenho favorável.

2.2.2 Resfriamento indireto bifásico

Como mencionado anteriormente, sistemas de gerenciamento térmico monofásico exibem capacidade de resfriamento relativamente baixa, assim como uniformidade. Para satisfazer o crescente fluxo de calor dissipado, um sistema bifásico, onde ocorre transição de fase líquido-vapor, é identificada como uma solução de resfriamento muito promissora [33]. Em comparação com o monofásico, o sistema bifásico pode fornecer uma eficiência de transferência de calor muito maior, distribuição de temperatura mais uniforme e menor potência de bombeamento em vazões mais baixas. Comumente, o sistema de resfriamento bifásico é baseado em sistemas convencionais de ar condicionado automotivo com uma placa fria servindo como evaporador [34]. A integração de um ciclo de compressão de vapor em miniatura permite que o meio de trabalho evapore e libere calor para o ambiente sob maior diferença de temperatura. O desempenho de uma placa fria monofásica e bifásica, usada para o inversor de motor Toyota Prius, foi comparado por Wang et al. [35] por meio de simulações. Em comparação com a placa fria monofásica, a placa fria bifásica, usando R134a como refrigerante, reduziu a temperatura de pico do dispositivo. Assim, o sistema bifásico apresenta grande potencial devido ao seu esquema de resfriamento de baixo custo, pequeno volume e alto desempenho, que pode melhorar significativamente a confiabilidade do sistema e a eficiência de conversão dos inversores de veículos.

No entanto, para as tecnologias de resfriamento bifásico, ainda existem algumas preocupações que precisam de investigações mais aprofundadas. Por exemplo, as instabilidades térmicas observadas nos microcanais podem resultar em flutuações de pressão, superaquecimento e até mesmo falha do dispositivo. Zhao et al. [36] propuseram uma nova tecnologia de resfriamento usando ebulição subresfriada em microcanais para reduzir a temperatura de junção da eletrônica de potência automotiva. Verificou-se numericamente que 25% a mais de calor podem ser removidos por meio da ebulição subresfriada em comparação com o esquema convencional de resfriamento por convecção forçada monofásica.

Mancin et al. [37] estudaram experimentalmente um ciclo de compressão de vapor em miniatura equipado com uma placa fria para resfriamento de eletrônicos em sistemas aeronáuticos. O R134a foi usado como fluido de trabalho e um novo compressor isento de óleo foi desenvolvido. O perfil de temperatura medido da placa fria destacou a presença das regiões de vaporização, que podem ser divididas em três partes: uma região de transferência de calor em regime bifásico, uma região de secagem e uma região de pós-secagem. Os resultados mostraram que o comportamento térmico e a operação segura do sistema podem ser afetados pelo fenômeno de secagem. Assim, mais investigações são necessárias sobre as características operacionais em regime bifásico para prever as condições críticas.

2.3 Resfriamento por contato direto

No contato direto o dispositivo e o dissipador de calor são normalmente integrados em um componente único para permitir o contato direto entre o dispositivo a ser resfriado e o fluido refrigerante. Como resultado, resistências térmicas extras podem ser eliminadas, tornando o processo de transferência de calor mais eficiente. Jung et al. [38] compararam a resistência térmica e a queda de pressão de três diferentes sistemas de resfriamento com base em microcanais. Os resultados experimentais demonstraram que o dissipador de calor cujo *manifold* foi fabricado com o mesmo material do dissipador de calor (Si) foi capaz de remover um fluxo de calor de 250 W/cm^2 , mantendo a temperatura máxima do chip abaixo de 90°C .

Nonneman et al. [39] realizaram uma comparação de diferentes métodos de resfriamento para um inversor típico de veículos elétricos, incluindo o resfriamento a ar, resfriamento a ar com tubos de calor embutidos, resfriamento a ar com uma câmara de vapor, placa fria de contato indireto, contato direto com uso de aletas e resfriamento

bifásico por imersão. Os resultados mostraram que o caso em que as aletas foram integradas sempre apresentou o melhor desempenho geral. Os resultados indicaram que a vida útil foi prolongada pela aplicação do resfriamento direto com uso de aletas. Já, Hou et al. [40] investigaram um evaporador de aletas em um sistema de refrigeração bifásico compacto com R134a como fluido de trabalho. Os resultados indicaram que um fluxo de calor acima de 380 W/cm^2 pode ser dissipado mantendo sua temperatura em cerca de 90°C . Em seguida, um refrigerante ecológico com baixos pontos de ebulição, R1234yf, foi selecionado como fluido de trabalho. Os resultados experimentais mostraram que o sistema pode dissipar um fluxo de calor de 526 W/cm^2 , mantendo a temperatura da junção abaixo de 120°C . Recentemente, T'Jollyn et al. [41] investigaram experimentalmente o desempenho da transferência de calor por meio da ebulição em piscina. Um refrigerante com menor potencial de aquecimento global, FK-649, foi usado como refrigerante para obter uma maior eficiência de dissipação de calor.

2.4 Resfriamento por jato colidente (*jet impingement*)

O resfriamento por jato colidente funciona pulverizando um fluido de trabalho sobre uma superfície a ser resfriada [42]. Os jatos têm diâmetro e velocidade conhecidos; porém, uma vez que o fluido de trabalho deixa o bocal, podem ocorrer diferentes efeitos nas gotas, a depender de sua massa e de sua velocidade, como vórtices e ondulações. O ângulo de impacto é um fator importante, sendo 90° mais usado para assegurar que o efeito de resfriamento seja simétrico em todas as direções [42]. Outro fator de controle é a distância da superfície a ser resfriada, em que se observa que quanto maior for a distância menor o impacto do jato, resultando em redução da capacidade de resfriamento.

O resfriamento por jato colidente tem sido amplamente adotado para gerenciamento térmico em várias aplicações industriais devido à sua proeminente capacidade de dissipar grandes fluxos de calor. No entanto, não tem sido implementado em veículos e aeronaves comercializados [43-45]. Dentre alguns estudos desenvolvidos, tem-se o de Gould et al. [46], os quais projetaram um sistema de resfriamento por jato colidente para resfriar um módulo de potência em VEH para aplicações militares. O dispositivo foi resfriado usando água-etileno glicol. A capacidade de dissipação de calor do módulo usando resfriamento por jato colidente aumentou 2,5 vezes em comparação com um sistema comercial de resfriamento de placa fria. Recentemente, Jones-Jackson et al. [47] compararam numericamente, considerando efeitos transitórios, o desempenho de um sistema de resfriamento com

uso de aletas e um sistema de resfriamento por jato colidente. Os resultados demonstraram que o sistema de resfriamento por jato colidente pode reduzir significativamente a temperatura da junção e melhorar a uniformidade da temperatura do módulo de potência. Além disso, o sistema foi capaz de garantir valores de temperaturas dentro da faixa operacional segura durante todo o ciclo de acionamento.

2.5 Resfriamento por *spray*

Além do resfriamento por jato colidente, o resfriamento por *spray* (Figura 4) também é considerado uma alternativa viável para aplicações em automóveis e aeronaves [48].

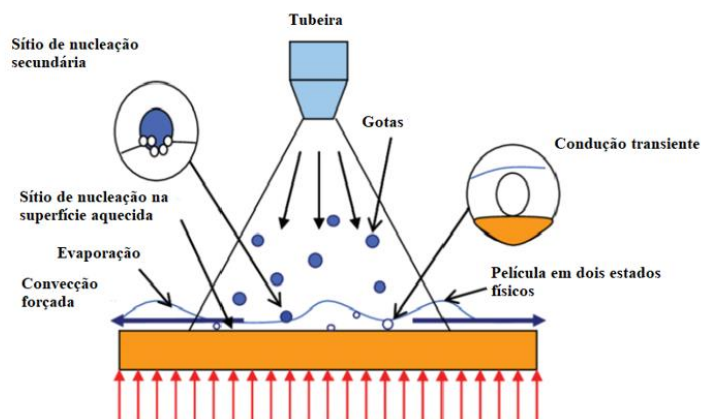
Figura 4 — Imagem do processo de resfriamento por *spray*.



Fonte: Adaptado de [6].

Diferente do jato colidente, onde o fluido é ejetado como uma corrente, o resfriamento por *spray* borrifado o fluido de trabalho diretamente sobre a superfície a ser resfriada, utilizando uma combinação de mecanismos de remoção de calor altamente eficientes, como evaporação e ebulição, Figura 5 [49-50]. Tem-se, por exemplo, o Laboratório Nacional de Energia Renovável do Departamento de Energia dos EUA explorando a viabilidade e a implementação do resfriamento por *spray* como solução de resfriamento para VEH [51]. De acordo com a avaliação de vários refrigerantes comerciais, o HFE-7100 foi identificado como o refrigerante ideal em termos de questões térmicas, ambientais, de segurança e compatibilidade de materiais.

Figura 5 — Desenho esquemático dos processos envolvidos no resfriamento por *spray*.



Fonte: Adaptado de [52].

A melhoria nas propriedades térmicas tanto da superfície quanto do fluido de trabalho é considerada uma abordagem muito promissora para melhorar o resfriamento por *spray*. Recentemente, Riaz Siddiqui et al. [53] investigaram o uso de nanofluidos como fluido de trabalho para resfriamento por *spray*. Comparado à água, o fluxo de calor crítico foi aprimorado em até 126% com o uso do nanofluido. Isso ocorreu principalmente devido ao alto calor latente de vaporização e aos efeitos de molhabilidade e capilaridade, intensificados para o caso do nanofluido. Os resultados indicaram que a eletrônica de potência usada em veículos elétricos poderia ser mantida abaixo de sua temperatura de falha aplicando nanofluido e resfriamento por *spray*, o que não pode ser alcançado usando água ou outro fluido dielétrico como refrigerante.

3. MÉTODOS PASSIVOS

3.1 Tubos de calor

Devido às vantagens proeminentes da operação passiva, design confiável, custo barato e desempenho superior, os tubos de calor são amplamente adotados para resfriamento eletrônico [54,55]. Não apenas uma transferência de calor eficiente, mas também uma distribuição de temperatura relativamente uniforme pode ser obtida através

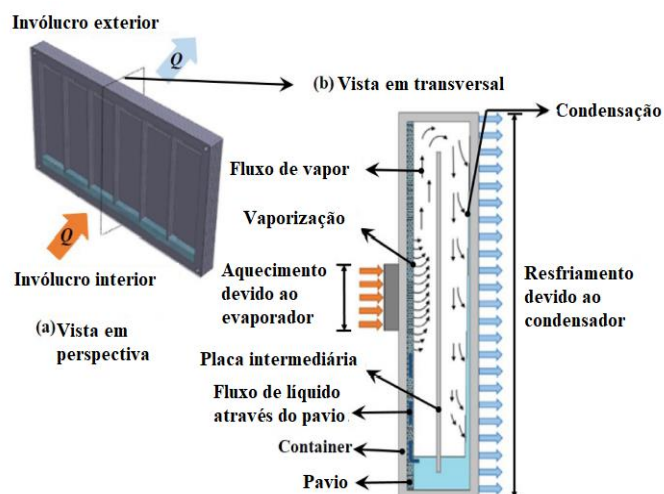
da utilização de tubos de calor. Vários tipos de tubos de calor já foram desenvolvidos para resfriar dispositivos em automóveis e aeronaves, como tubos de calor planos (câmara de vapor ou, em inglês, *vapor chamber*), tubos de calor pulsantes (em inglês, *Pulsating Heat Pipes*, PHPs) e tubos de calor em circuito (em inglês, *Looping Heat Pipes*, LHPs) [54,56].

É uma alternativa promissora de sistema de controle térmico passivo, o qual consiste de um invólucro fechado dividido em um evaporador, seção adiabática e uma seção condensadora [17]. Um meio de resfriamento adicional (ar ou líquido) geralmente é necessário para ajudar com a condensação do fluido. Então, por meio de um processo capilar, o fluido condensado retorna ao evaporador. Um tubo de calor é um dispositivo que possui uma estrutura compacta, leve e flexível que requer baixa manutenção e com excelente ciclo de vida.

Wu et al. [57] testaram um sistema de tubos de calor para baterias analisando o desempenho térmico. Os resultados mostraram que o método não somente reduziu a temperatura da superfície da bateria como também, melhorou a distribuição de temperatura do sistema.

Reyes et al. [58] desenvolveram um dissipador de calor baseado em câmara de vapor colocado verticalmente para resfriamento de aviônicos. Uma área de minievaporação composta por um conjunto de aletas foi implementada para melhorar o processo de ebulição dentro da câmara de vapor. Para uma temperatura de superfície do componente variando de 80 a 100 °C, a potência máxima dissipada variou entre 95 e 145 W. Da mesma forma, Jones et al. [59] incorporaram uma câmara de vapor dentro do chassi de um módulo aviônico para reduzir a resistência térmica entre os componentes aviônicos e o trocador de calor do módulo. A Figura 6 ilustra um novo termossifão desenvolvido para resfriamento de aviônicos [60]. Em geral, este termossifão é semelhante a uma câmara de vapor colocada verticalmente.

Figura 6 — Termossifão e seu princípio de funcionamento.



Fonte: Adaptado de [60].

Diferente dos tradicionais tubos de calor planos operando na orientação vertical, uma placa intermediária foi inserida no termossifão para dividir o dispositivo em duas seções conectadas. Desta forma, a circulação do fluido de trabalho dentro do dispositivo pode ser melhorada, garantindo assim uma operação mais eficiente. Além disso, na superfície interna do evaporador, um meio poroso foi adicionado para suprimir o acúmulo de líquido no lado inferior do termossifão. Além disso, o fluido de trabalho na superfície interna do evaporador pode ser reabastecido por meio da força capilar (devido à presença do meio poroso).

Já um tubo de calor pulsante (PHP) consiste em um único tubo simples do tamanho de um capilar com muitas voltas em U. O calor é absorvido em uma extremidade e então é transportado para a outra extremidade por meio do movimento oscilatório e a mudança de fase do fluido de trabalho no interior do tubo/canal capilar.

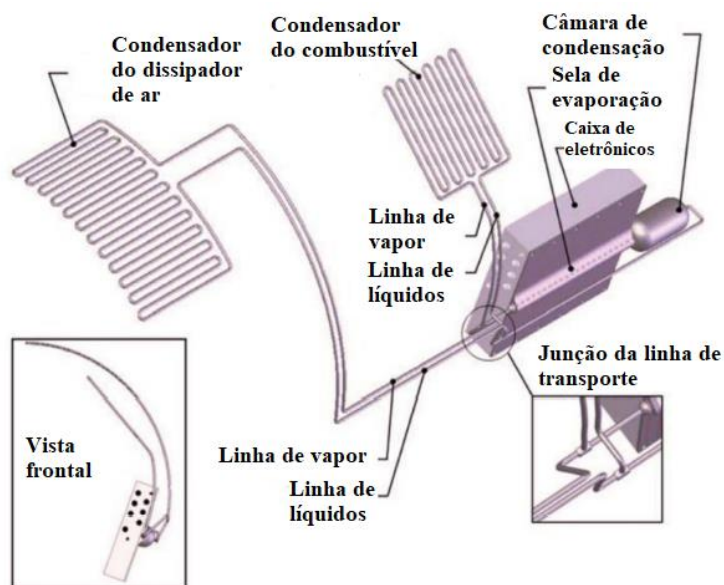
Cai et al. [61] investigaram experimentalmente o desempenho térmico de um sistema de resfriamento baseado em PHP em aplicações aviônicas. PHPs com diâmetro interno de 1,65 mm foram montados com placas de circuito impresso no chassi de aviônicos. Desta forma, um caminho mais rápido de transferência de calor da eletrônica para o dissipador de calor externo foi construído, melhorando assim a transferência de calor. Os resultados experimentais indicaram que os PHPs foram capazes de dissipar altas potências, mantendo uma distribuição de temperatura mais uniforme em comparação com sistemas de resfriamento convencionais. Além disso, as flutuações de temperatura do evaporador foram reduzidas a uma faixa razoável para garantir uma operação eficiente da eletrônica.

No caso dos tubos de calor em circuito (LHP), em comparação com os tubos de

calor convencionais, as seções de evaporação e condensação bem como as linhas de líquido e vapor estão separadas fisicamente para reduzir as perdas e existe um reservatório de líquido para promover uma alimentação adequada do evaporador. Assim, LHPs exibem alta flexibilidade e capacidade de transporte de calor por longas distâncias contra o campo de gravidade [62-64].

Para validar a aplicação de LHPs em aeronaves, a União Européia lançou um projeto denominado “HTCS” (*Passive cooling solution validation for aircraft application*) para resfriamento eficiente de MEA [65]. Ao integrar dispositivos de resfriamento passivo, a temperatura máxima do equipamento foi reduzida significativamente. A Advanced Cooling Technologies Inc. desenvolveu recentemente uma série de dispositivos passivos de gerenciamento térmico para resfriamento de aviônicos [66,67]. Por exemplo, para realizar a redução do gradiente de temperatura interna, eles desenvolveram um sistema de gerenciamento térmico para resfriamento de aviônicos em ambientes de alta temperatura usando LHP e conjuntos de tubo de calor, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 — Sistema de gerenciamento térmico com base em LHP.



Fonte: Adaptado de [67].

3.2 Materiais de mudança de fase (PCMs)

Durante a operação prática de dispositivos elétricos a bordo de veículos e aeronaves, a carga de energia e de calor correspondente está geralmente sujeita a flutuações periódicas ou não periódicas. Além disso, os picos de potência são geralmente maiores do que a potência média dentro de um ciclo de trabalho. Consequentemente, os perfis

térmicos são frequentemente caracterizados por flutuações e picos. Neste cenário, os PCMs apresentam vantagens particulares para lidar com tais problemas [68,69]. Como a geração de calor não é constante, os PCMs são geralmente adotados como buffer térmico no sistema de gerenciamento térmico, armazenando temporariamente o calor liberado pelos dispositivos eletrônicos e de potência.

Como um método de resfriamento passivo, os sistemas de gerenciamento térmico PCM possuem muitos méritos, incluindo simplicidade, alta eficiência e sem necessidade de componentes extras, como sopradores [69]. Para contornar a questão da baixa condutividade comum de PCMs pode-se inserir no mesmo um material condutor como grafite, fibra de carbono, ou utilizar espumas metálicas.

Ao incorporar PCMs em sistemas de gerenciamento térmico, a seleção do material deve ser cuidadosamente considerada. Em geral, a seleção de PCMs depende do ponto de fusão e da temperatura média de operação da fonte de calor. Além disso, as características de alto calor latente, alta condutividade térmica, baixa taxa de variação de volume, baixa densidade e baixo custo também são desejadas.

No entanto, um balanço entre esses fatores deve ser feita em aplicações práticas. Por exemplo, PCMs metálicos com alta condutividade térmica apresentam uma resposta térmica rápida, mas o peso, custo e complexidade de integração dificultam sua aplicação. Ao contrário, os PCMs orgânicos comumente usados têm alto calor latente e baixo custo, mas apresentam baixo desempenho de transferência de calor devido à baixa condutividade [70,71]. Neste sentido, o aprimoramento da transferência de calor pode ser alcançado por meio de otimização geométrica ou melhoria da condutividade térmica [72].

A seleção de um PCM deve levar em consideração suas propriedades térmica, química, física, cinética, além de fatores como custo-benefício. Rao e Wang listaram alguns requisitos para escolha de um PCM apropriado para o gerenciamento térmico [73]: ponto de fusão dentro da faixa de temperatura de operação desejável; alto calor latente, capacidade calorífica e condutividade térmica; baixa dilatação volumétrica após processo de mudança de fase; ser estável, não tóxico, não inflamável e não explosivo; e, ser comercialmente econômico.

4. COMENTÁRIOS FINAIS

O presente trabalho abordou os desafios térmicos da eletrônica de potência a bordo de automóveis e aeronaves. O gerenciamento térmico em aplicações

automotivas e aeronáuticas será muito mais crucial no futuro devido ao aumento da potência e minimização do tamanho dos dispositivos eletrônicos aplicados. Este trabalho abordou as características estruturais, de desempenho térmico e a tendência de desenvolvimento em tecnologias de gerenciamento térmico ativo e passivo. As vantagens e desvantagens de algumas tecnologias de gerenciamento térmico são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 — Comparação de tecnologias de gerenciamento térmico para eletrônicos a bordo de automóveis e aeronaves.

	Vantagens	Desvantagens
Resfriamento forçado a ar	Compacto, layout simples e baixo custo	Baixa eficiência de transferência de calor
Resfriamento por contato indireto monofásico	Maior eficiência de transferência de calor em comparação com resfriamento forçado a ar; alta escalabilidade	Baixa uniformidade de temperatura; baixa capacidade de dissipação de calor; dependente da vazão
Resfriamento por contato indireto bifásico	Eficiência de transferência de calor muito maior; temperatura da superfície mais uniforme	Instabilidade térmicas no escoamento; escalabilidade
Resfriamento por contato direto	Maior desempenho de transferência de calor; tamanho mais compacto e peso mais leve (em comparação com o resfriamento de contato indireto)	Escalabilidade; baixa uniformidade de temperatura (em comparação com o resfriamento de contato indireto)
Jato colidente e resfriamento por <i>spray</i>	Capacidade de dissipação de calor muito maior	Perda de pressão muito maior; capacidade de controle relativamente menor
Tubos de calor	Alta eficiência de transferência de calor e uniformidade de temperatura; sem consumo de energia; vida útil longa; design flexível; baixo requisito de manutenção	Capacidade de dissipação de calor limitada
PCMs	Alta confiabilidade; alta escalabilidade; sem consumo de energia; competitivo para carga térmica	Tempo de operação depende fortemente da massa

Fonte: Próprio Autor

Embora o jato colidente e o resfriamento por *spray* possam fornecer alternativas promissoras, esses não são aplicados de forma prática para resfriamento eletrônico em automóveis e aeronaves comercializados até agora.

A aplicação de métodos passivos, incluindo tubos de calor e PCMs, tem sido amplamente utilizada. Vários tipos de tubos de calor são integrados em sistemas de gerenciamento térmico, reduzindo significativamente a resistência térmica e melhorando a uniformidade de temperatura dos dispositivos eletrônicos. Particularmente, LHPs são muito mais atraentes para fontes de calor localizadas remotamente aos dissipadores de calor. Devido ao perfil térmico flutuante da eletrônica de bordo, os PCMs apresentam grandes vantagens na proteção contra superaquecimento e no buffer térmico, armazenando temporariamente o calor liberado pelo dispositivo eletrônico. Observe que a análise térmica transiente é necessária para determinar a adequação de um dissipador de calor e garantir a temperatura de pico máxima dentro das faixas operacionais seguras.

Em última análise, a escolha da tecnologia para gerenciamento térmico mais vantajosa depende dos requisitos e restrições específicos da aeronave e seus sistemas. Uma combinação de diferentes tecnologias é frequentemente empregada em aeronaves para obter a solução ideal de gerenciamento térmico, equilibrando fatores como peso, custo, desempenho e confiabilidade.

Um fato que merece atenção é que a maioria dos estudos investiga sistemas de gerenciamento térmico para eletrônica a bordo de automóveis e aeronaves apenas em modo operacional normal. Estudos sobre os efeitos de fatores ambientais agressivos, incluindo vibrações, choques, aceleração e micro/hipergravidade, são insuficientes. Assim, mais investigações precisam ser realizadas para obter conhecimento aprofundado do comportamento térmico e fluidodinâmico do sistema de resfriamento em ambientes hostis.

Uma forma de medir o quanto que uma tecnologia é suficientemente madura para uma determinada aplicação é através da escala TRL (*Technology Readness Level*). O uso da escala TRL permite o acompanhamento de ativos tecnológicos durante os processos de pesquisa, desenvolvimento e validação, bem como possibilita comparação direta entre ativos. A sua abordagem tem sido usada no planejamento de tecnologias espaciais e

incorporada na Instrução de Gerenciamento da NASA que aborda o planejamento integrado de tecnologia [73]. Os níveis da escala TRL podem ser descritos como:

- TRL 1: Corresponde à ideação; princípios básicos observados e reportados.
- TRL 2: Concepção tecnológica e/ou aplicação formulada.
- TRL 3: Prova de conceitos das funções críticas de forma analítica ou experimental.
- TRL 4: Validação em ambiente de laboratório de componentes ou arranjos experimentais similares ao real.
- TRL 5: Validação em ambiente relevante de componentes ou arranjos experimentais com configurações físicas finais (prototipagem).
- TRL 6: Modelo do sistema/subsistema protótipo de demonstrador em ambiente relevante.
- TRL 7: Demonstração em ambiente operacional (protótipo está demonstrado e validado em ambiente operacional).
- TRL 8: A tecnologia foi testada e qualificada para ambiente real, estando pronta para ser implementada em um sistema ou tecnologia já existente.
- TRL 9: Sistema já foi operado em todas as condições, extensão e alcance.

No caso específico dos sistemas de controle de temperatura, a Tabela 2 exemplifica, para o caso de tecnologias aplicadas ao resfriamento de bateria, como encontra-se a escala TRL.

Tabela 2 — Demonstração da posição relativa de cada tecnologia de resfriamento de bateria.

Technology Readiness Level	Ar	Líquido	PCM	Tubo de Calor
TRL 9— Industrialização completa	O	O		
TRL 8— Otimização	O	O		
TRL 7— Entrada em produção	O	O		
TRL 6— Desenvolvimento da aplicação do produto	O	O	O	O
TRL 5— Verificação do equipamento de produção	O	O	O	O
TRL 4— Verificação em um protótipo	O	O	O	O
TRL 3— Verificação laboratorial	O	O	O	O
TRL 2— Análise de confiabilidade e viabilidade	O	O	O	O
TRL 1— Investigação dos fundamentos da tecnologia	O	O	O	O

Fonte: Adaptado de [74].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Diaz, M.N. Electric Vehicles: A Primer on Technology and Selected Policy Issues; R46231; Congressional Research Service: Washington, DC, USA, 2020.
2. Huque, M.A.; Islam, S.K.; Blalock, B.J.; Su, C.; Vijayaraghavan, R.; Tolbert, L.M. Silicon-on-Insulator Based High-Temperature Electronics for Automotive Applications. In Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Cambridge, UK, 30 June–2 July 2008.
3. Nakayama, W.; Suzuki, O.; Hara, Y. Thermal Management of Electronic and Electrical Devices in Automobile Environment. In Proceedings of the 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, MI, USA, 7–10 September 2009.
4. Johnson, R.W.; Evans, J.L.; Jacobsen, P.; Thompson, J.R.R.; Christopher, M. The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics. *IEEE Trans. Electron. Packag. Manuf.* **2004**, *27*, 164–176.
5. Langmaack, N.; Tareilus, G.; Henke, M. Modular Power Electronics for Electric Vehicles and Aviation Applications. In Proceedings of the 2019 IEEE 13th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), Toulouse, France, 9–12 July 2019.
6. Liu, X.; Wu, Z.; Yan, Y.; Kang, Y.; Chen, C. A Novel Double-Sided Cooling Inverter Leg for High Power Density EV Based on Customized SiC Power Module. In Proceedings of the 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 11–15 October 2020.
7. Lai, J.-S.; Yu, W.; Qian, H.; Sun, P.; Ralston, P.; Meehan, K. High Temperature Device Characterization for Hybrid Electric Vehicle Traction Inverters. In Proceedings of the 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Washington, DC, USA, 15–19 February 2009.
8. Passmore, B.S.; Lostetter, A.B. A review of SiC power module packaging technologies Attaches, interconnections, and advanced heat transfer. In Proceedings of the 2017 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP), Delft, The Netherlands, 5–7 April 2017.
9. Hassan, A.; Savaria, Y.; Sawan, M. Electronics and Packaging Intended for Emerging Harsh Environment Applications: A Review. *IEEE Trans. Very Large Scale Integr. VLSI Syst.* **2018**, *26*, 2085–2098.
10. Robles, J. A system level view of Avionics—Vetronics cooling options for harsh environment two-level maintenance systems. In Proceedings of the Twentieth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, San Jose, CA, USA, 11 March 2004.

11. Korta, J.; Skruch, P.; Holon, K. Reliability of Automotive Multidomain Controllers: Advancements in electronics cooling technologies. *IEEE Veh. Technol. Mag.* **2021**, *16*, 86–94.
12. Mc Cluskey, P.; Saadon, Y.; Yao, Z.; Shah, J.; Kizito, J. Thermal Management Challenges in Turbo-Electric and Hybrid Electric Propulsion. In *Proceedings of the 2018 International Energy Conversion Engineering Conference*, Cincinnati, OH, USA, 9–11 July 2018.
13. Jafari, S.; Nikolaidis, T. Thermal Management Systems for Civil Aircraft Engines: Review, Challenges and Exploring the Future. *Appl. Sci.* **2018**, *8*, 2044.
14. Wileman, A.J.; Aslam, S.; Perinpanayagam, S. A road map for reliable power electronics for more electric aircraft. *Prog. Aerosp. Sci.* **2021**, *127*, 100739.
15. Mao, Y.F.; Li, Y.Z.; Wang, J.X.; Xiong, K.; Li, J.X. Cooling Ability/Capacity and Exergy Penalty Analysis of Each Heat Sink of Modern Supersonic Aircraft. *Entropy* **2019**, *21*, 223.
16. Lv, Yi-Gao et al. Thermal Management Technologies Used for High Heat Flux Automobiles and Aircraft: A Review. *Energies*, v. 15, n. 21, p. 8316, 2022.
17. Kelly, K.J.; Abraham, T.; Bennion, K.; Bharathan, D.; Narumanchi, S.; O'Keefe, M. Assessment of thermal control Technologies for cooling electric vehicle power electronics. In *Proceedings of the 23rd International Electric Vehicle Symposium (EVS-23)*, Anaheim, CA, USA, 2–5 December 2007.
18. Jaguemont, J.; Van Mierlo, J. A comprehensive review of future thermal management systems for battery-electrified vehicles. *Journal of Energy Storage*, v. 31, p. 101551, 2020.
19. Choudhari, V. G.; Dhoble, A. S.; Sathe, T. M. A review on effect of heat generation and various thermal management systems for lithium ion battery used for electric vehicle. *Journal of Energy Storage*, v. 32, p. 101729, 2020.
20. Du, D.; Darkwa, J.; Kokogiannakis, G. Thermal management systems for photovoltaics (PV) installations: a critical review. *Solar Energy*, v. 97, p. 238–254, 2013.
21. Liu, T.; Huang, Z.; Tan, Y.; Chen, C.; Zou, K.; Peng, H.; Kang, Y.; Luo, F. A high power density and high efficiency three phase inverter based on a hybrid 3D SiC packaging power module. In *Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, USA, 23–27 September 2018.
22. Zeng, Z.; Zhang, X.; Blaabjerg, F.; Chen, H.; Sun, T. Stepwise Design Methodology and Heterogeneous Integration Routine of Air-Cooled SiC Inverter for Electric Vehicle. *IEEE Trans. Power Electron.* **2020**, *35*, 3973–3988.

23. Icoz, T.; Arik, M. Light Weight High Performance Thermal Management with Advanced Heat Sinks and Extended Surfaces. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* **2010**, *33*, 161–166.
24. Zhang, Y.; Fan, C.; Li, G. Discussions of Cold Plate Liquid Cooling Technology and Its Applications in Data Center Thermal Management. *Frontiers in Energy Research*, v. 10, p. 954718, 2022.
25. Singh, J.; Montesinos-Castellanos, A.; Nigam, K. D. P. Process intensification for compact and micro heat exchangers through innovative technologies: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 58, n. 31, p. 13819–13847, 2019.
26. Abramushkina, E.; Zhaksylyk, A.; Geury, T.; El Baghdadi, M.; Hegazy, O. A Thorough Review of Cooling Concepts and Thermal Management Techniques for Automotive WBG Inverters: Topology, Technology and Integration Level. *Energies* **2021**, *14*, 4981.
27. Olejniczak, K.; Flint, T.; Simco, D.; Storkov, S.; McGee, B.; Shaw, R.; Passmore, B.; George, K.; Curbow, A.; McNutt, T. A compact 110 kVA, 140_C ambient, 105_C liquid cooled, all-SiC inverter for electric vehicle traction drives. In Proceedings of the 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa, FL, USA, 26–30 March 2017.
28. Becker, N.; Bulovic, S.; Bittner, R.; Herzer, R. Thermal Simulation for Power Density Optimization of SiC-MOSFET Automotive Inverter. In Proceedings of the 11th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Berlin, Germany, 24–26 March 2020.
29. Gurpinar, E.; Wiles, R.; Ozpineci, B.; Raminoso, T.; Zhou, F.; Liu, Y.; Dede, E.M. SiC MOSFET-Based Power Module Design and Analysis for EV Traction Systems. In Proceedings of the 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, USA, 23–27 September 2018.
30. Ladeinde, F.; Muley, A.; Stoia, M.; Ek, G.; Alabi, K.; Li, W. Experimental measurements and mathematical modeling of cold plate for aviation thermal management. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2022**, *191*, 122810.
31. Raske, N.; Gonzalez, O.A.; Furino, S.; Pietropaoli, M.; Shahpar, S.; Montomoli, F. Thermal management for electrification in aircraft engines optimization of coolant system. In Proceedings of the ASME Turbo Expo 2022, Rotterdam, The Netherlands, 13–17 June 2022.
32. Wang, P.; McCluskey, P.; Bar-Cohen, A. Hybrid Solid- and Liquid-Cooling Solution for Isothermalization of Insulated Gate Bipolar Transistor Power Electronic Devices. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* **2013**, *3*, 601–611.
33. Fan, S.; Duan, F. A review of two-phase submerged boiling in thermal management of electronic cooling. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2020**, *150*, 119324.

34. Aranzabal, I.; de Alegria, I.M.; Delmonte, N.; Cova, P.; Kortabarria, I. Comparison of the Heat Transfer Capabilities of Conventional Single- and Two-Phase Cooling Systems for an Electric Vehicle IGBT Power Module. *IEEE Trans. Power Electron.* **2019**, *34*, 4185–4194.
35. Wang, P.; McCluskey, P. Evaluation of Two-Phase Cold Plate for Cooling Electric Vehicle Power Electronics. In Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Denver, CO, USA, 11–17 November 2011.
36. Zhao, W.; France, D.M.; Yu, W.; Singh, D. Subcooled Boiling Heat Transfer for Cooling of Power Electronics in Hybrid Electric Vehicles. *J. Electron. Packag.* **2015**, *137*, 031013.
37. Mancin, S.; Zilio, C.; Righetti, G.; Rossetto, L. Mini Vapor Cycle System for high density electronic cooling applications. *Int. J. Refrig.* **2013**, *36*, 1191–1202.
38. Jung, K.W.; Kharangate, C.R.; Lee, H.; Palko, J.; Zhou, F.; Asheghi, M.; Dede, E.M.; Goodson, K.E. Microchannel cooling strategies for high heat flux (1 kW cm²) power electronic applications. In Proceedings of the 2017 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Orlando, FL, USA, 30 May–2 June 2017.
39. Nonneman, J.; T’Jollyn, I.; Clarie, N.; Weckx, S.; Sergeant, P.; Paepe, M.D. Model-Based Comparison of Thermo-Hydraulic Performance of Various Cooling Methods for Power Electronics of Electric Vehicles. In Proceedings of the 17th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), San Diego, CA, USA, 29 May–1 June 2018.
40. Hou, F.; Wang, W.; Zhang, H.; Chen, C.; Chen, C.; Lin, T.; Cao, L.; Zhang, G.Q.; Ferreira, J.A. Experimental evaluation of a compact two-phase cooling system for high heat flux electronic packages. *Appl. Therm. Eng.* **2019**, *163*, 114338.
41. T’Jollyn, I.; Nonneman, J.; Beyne, W.; De Paepe, M. Nucleate pool boiling heat transfer and critical heat flux of FK-649 on an inverter power module. *Heat Mass Transf.* **2022**, *15*, 1–8.
42. Plant, R.D.; Friedman, J.; Saghir, M.Z. A Review of Jet Impingement Cooling. *International Journal of Thermofluids*, p. 100312, 2023.
43. Nadda, R.; Kumar, A.; Maithani, R. Efficiency improvement of solar photovoltaic/solar air collectors by using impingement jets: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *93*, 331–353.
44. Devahdhanush, V.S.; Mudawar, I. Review of Critical Heat Flux (CHF) in Jet Impingement Boiling. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2021**, *169*, 120893.
45. Eng Ewe, W.; Fudholi, A.; Sopian, K.; Solomin, E.; Hossein Yazdi, M.; Asim, N.; Fatima, N.; Pikra, G.; Sudibyo, H.; Fatriasari, W.; et al. Jet impingement cooling ap-

plications in solar energy technologies: Systematic literature review. *Therm. Sci. Eng. Prog.* **2022**, 34, 101445.

46. Gould, K.; Cai, Q.S.; Neft, C.; Bhunia, A. Thermal management of silicon carbide power module for military hybrid vehicles. In *Proceedings of the 2014 Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (SEMI-THERM)*, San Jose, CA, USA, 9–13 March 2014.
47. Jones-Jackson, S.; Azer, P.; Emadi, A. Improved Thermal Management of Power Modules at Transient Heat Loading using Jet Impingement. In *Proceedings of the 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Anaheim, CA, USA, 15–17 June 2022; pp. 180–184.
48. Chen, H.; Ruan, X.-H.; Peng, Y.-H.; Wang, Y.-L.; Yu, C.-K. Application status and prospect of spray cooling in electronics and energy conversion industries. *Sustain. Energy Technol. Assess.* **2022**, 52, 102181.
49. Liang, G.; Mudawar, I. Review of spray cooling—Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2017**, 115, 1174–1205.
50. Liang, G.; Mudawar, I. Review of spray cooling—Part 2: High temperature boiling regimes and quenching applications. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2017**, 115, 1206–1222.
51. Mudawar, I.; Bharathan, D.; Kelly, K.; Narumanchi, S. Two-Phase Spray Cooling of Hybrid Vehicle Electronics. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* **2009**, 32, 501–512.
52. Tyagi, P.K.; Kumar, R.; Mondal, P.Kumar. A review of the state-of-the-art nanofluid spray and jet impingement cooling. *Physics of Fluids*, v. 32, n. 12, 2020.
53. Riaz Siddiqui, F.; Tso, C.-Y.; Qiu, H.; Chao, C.Y.H.; Chung Fu, S. Hybrid nanofluid spray cooling performance and its residue surface effects: Toward thermal management of high heat flux devices. *Appl. Therm. Eng.* **2022**, 211, 118454.
54. Mochizuki, M. Latest development and application of heat pipes for electronics and automotive. In *Proceedings of the 2017 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ)*, Kyoto, Japan, 20–22 November 2017.
55. Chen, X.; Ye, H.; Fan, X.; Ren, T.; Zhang, G. A review of small heat pipes for electronics. *Appl. Therm. Eng.* **2016**, 96, 1–17.
56. Singh, R.; Mochizuki, M.; Saito, Y.; Yamada, T.; Nguyen, T.; Nguyen, T. Heat pipe applications in cooling automotive electronics. *Heat Pipe Sci. Technol. Int. J.* **2016**, 7, 57–69.
57. Wu, M.S.; Liu, K.H.; Wang, Y.Y.; Wan, C.C. Heat dissipation design for lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources* 109 (1) (2002) 160–166, [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00048-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00048-4).

58. Reyes, M.; Alonso, D.; Arias, J.R.; Velazquez, A. Experimental and theoretical study of a vapour chamber based heat spreader for avionics applications. *Appl. Therm. Eng.* **2012**, *37*, 51–59.
59. Jones, A.B.; Chen, R. Experimental Assessment of Vapour Chamber Heater Spreader Implementation in Avionic Cooling. In *Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Kissimmee, FL, USA, 5–9 January 2015.
60. Junior, A.A.M.; Mantelli, M.B.H. Thermal performance of a novel flat thermosyphon for avionics thermal management. *Energy Convers. Manag.* **2019**, *202*, 112219.
61. Cai, Q.; Chen, C.-l.; Asfia, J.F. Experimental Investigations of an Avionics Cooling System for Aerospace Vehicle. *J. Spacecr. Rocket.* **2007**, *44*, 439–444.
62. Pagnoni, F.; Ayel, V.; Bertin, Y.; Coulloux, J.; Zebian, M. Loop Heat Pipe for Thermal Management of Aircraft Engine Equipment. *J. Thermophys. Heat Transf.* **2021**, *35*, 323–334.
63. Nakamura, K.; Odagiri, K.; Nagano, H. Study on a loop heat pipe for a long-distance heat transport under anti-gravity condition. *Appl. Therm. Eng.* **2016**, *107*, 167–174.
64. Lian, W.; Niu, W.; Lin, L. A passive cooling design for an aircraft electromechanical actuator by using heat pipes. *Appl. Therm. Eng.* **2021**, *184*, 116248.
65. Passive Cooling Solution Validation for Aircraft Application. Available online: <https://cordis.europa.eu/project/id/323528/reporting>
66. Ellis, M.; Montgomery, J. Passive Thermal Management for Avionics in High Temperature Environments. In *Proceedings of the SAE 2014 Aerospace Systems and Technology Conference*, Cincinnati, OH, USA, 23–25 September 2014.
67. Anderson, W.G.; Hartenstine, J.; Ellis, M.; Montgomery, J.; Peters, C. Electronics Cooling Using High Temperature Loop Heat Pipes with Multiple Condensers. In *Proceedings of the SAE Power Systems Conference*, Worth, TX, USA, 2–4 November 2010.
68. Hua, W.; Zhang, L.; Zhang, X. Research on passive cooling of electronic chips based on PCM: A review. *J. Mol. Liq.* **2021**, *340*, 117183.
69. Bianco, V.; De Rosa, M.; Vafai, K. Phase-change materials for thermal management of electronic devices. *Appl. Therm. Eng.* **2022**, *214*, 118839.
70. Liu, Huaqiang et al. Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review. *Energy conversion and management*, v. 150, p. 304–330, 2017.

71. Hartsfield, C.R.; Shelton, T.E.; Palmer, B.O.; O'Hara, R. All-Metallic Phase Change Thermal Management Systems for Transient Spacecraft Loads. *J. Aerosp. Eng.* **2020**, *33*, 04020039.
72. Ghosh, D.; Ghose, J.; Datta, P.; Kumari, P.; Paul, S. Strategies for phase change material application in latent heat thermal energy storage enhancement: Status and prospect. *J. Energy Storage* **2022**, *53*, 105179.
73. Rao Z, Wang S. A review of power battery thermal energy management. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;*15*:4554–71. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.096>.
74. Chu, A. et al. (2020). The Design and Investigation of a Cooling System for a High Power Ni-MH Battery Pack in Hybrid Electric Vehicles. *Applied Sciences*. 10. 1660. 10.3390/app10051660.