

# Análise e Projeto Térmico para Conversores Eletrônicos Baseados em Semicondutores GaN Utilizando Engenharia Assistida por Computador

Campos, Abner \* Bender, Vitor C. \* Duarte, Renan R. \*  
Piovesan, Tális \* Dalla Costa, Marco A. \*

\* *Universidade Federal de Santa Maria;*  
(*e-mail: abner.campos@gedre.ufsm.br*).

---

**Abstract:** The numerical moderator generalization of Computer-aided engineering (CAE) for physical systems made it become one of the best solving-problem methods in a great variety of engineering disciplines, such electromagnetism, heat transfer and fluid dynamics. The goal of this work is to use CAE for thermal simulation of static converters that use gallium nitride (GaN) semiconductors. A converter's printed circuit board (PCB) was built and tested to establish the baseline performance of the project. This is analyzed with a pre-processing cycle, solution, evaluation of results and update of the model until simulation and experimental results are coherent. Taking as a practical example for validation of simulations and thermal performance of the GaN semiconductors, a Boost converter of 100W was used. Thereby, it is expected to develop, on an iterative way, a heat dissipation system in order to avoid the overheating of the components in this circuit, reducing the cost and the time demanded for the development of solutions and for the thermal management of the converters, making the development of electronic converters faster and optimized.

**Resumo:** A generalização para modelagem numérica utilizando engenharia assistida por computador (Computer-aided engineering – CAE) para sistemas físicos fez com que esta se tornasse uma das melhores formas para a solução de problemas em uma variedade de disciplinas de engenharia, por exemplo eletromagnetismo, transferência de calor e dinâmica dos fluidos. Neste trabalho propõe-se a utilização da CAE para a simulação térmica de conversores estáticos que utilizam semicondutores de nitreto de gálio (GaN). Uma placa de circuito impresso (PCB) do conversor foi construída e testada para estabelecer o desempenho da linha de base do projeto. Esse é analisado com um ciclo de pré-processamento, solução, análise dos resultados e atualização do modelo até que os resultados corroborem para o arrefecimento do dispositivo. Como exemplo prático para validações das simulações e desempenho térmico dos semicondutores GaN, utilizou-se um conversor Boost de 100W. Com isso, espera-se desenvolver, de forma iterativa, um sistema de dissipação de calor para evitar o sobreaquecimento dos componentes deste circuito, reduzindo os custos e o tempo necessários para o desenvolvimento de soluções para o gerenciamento térmico destes conversores, tornando o desenvolvimento de conversores eletrônicos mais rápido e otimizado.

*Keywords:* CAE, FVM, FEM, GaN, Electronics, Simulation, Materials, Temperature.

*Palavras-chaves:* CAE, MVF, MEF, GaN, Eletrônica, Simulação, Materiais, Temperatura.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Semicondutores de Nitreto de Gálio (GaN) são considerados inovadores na área de eletrônica de potência, especialmente no campo dos conversores estáticos de alto desempenho. Estes semicondutores são considerados devido as suas reduzidas perdas em comutação, permitindo assim, um aumento considerável na frequência de operação dos conversores eletrônicos, reduzindo o volume e peso dos componentes passivos do circuito e consequentemente dos próprios conversores (Lidow et al., 2019). Mas a estes fatores, uma série de problemas como compatibilidade eletromagnética e superaquecimento surgem nos dispositivos

(Dede et al., 2017). Assim, por serem muito pequenos e operarem com potências elevadas, semicondutores GaN possuem uma elevada densidade de potência, o que dificulta o gerenciamento térmico destes dispositivos, contemplando então uma pesquisa científica para o tratamento desses problemas (Yu et al., 2015).

A CAE baseia-se em um método numérico para resolução de problemas com equações diferenciais e/ou integrais. Seu princípio está em analisar um corpo contínuo e o dividir em pequenos subdomínios (elementos ou volumes), seguindo a teoria geral de conservação de massa, força, energia e outros (Alves Filho, 2018). Ao dividir os domínios em vários subdomínios, cada um possuirá um subconjunto

de equações e todos estes subconjuntos são recombinados nos conjuntos de equações sistemáticas e, com técnicas de soluções numéricas, computa-se os resultados finais (Hughes, 2012).

Modelos 3D baseados em CAE foram usados para simular a distribuição de temperatura nos protótipos. Alguns exemplos de programas que utilizam engenharia assistida por computador são: MSC Nastran, Femap, HyperWorks, MSC Apex, ANSYS Workbench. Assim, neste trabalho propõe-se a utilização de CAE para a simulação térmica de um conversor estático que utiliza semicondutores GaN. Para isso, será utilizado o programa ANSYS CFX da plataforma ANSYS Workbench. Este software é otimizado para solucionar problemas relacionados à transferência de calor e dinâmica dos fluidos.

Neste trabalho, apenas a topologia geral do método é explorada para a operacionalidade em softwares de simulação que consideram este método, já que o objetivo aqui é propiciar um primeiro contato com a CAE. Visto que os comportamentos térmicos são questões críticas na confiabilidade e design da PCB a serem modelados em CAE, começando pela descrição da estrutura do dispositivo e medições em um conversor Boost para, posteriormente, propor melhorias no arrefecimento do dispositivo.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: A topologia e as descrições geométricas do circuito são apresentadas na seção 2. Na seção 3 serão expostas propostas de melhorias no arrefecimento do circuito. Por fim, uma análise comparativa é apresentada na seção 4. E a seção 5 apresentará as principais conclusões deste estudo.

## 2. TOPOLOGIA DO CIRCUITO E DESCRIÇÕES GEOMÉTRICAS

O circuito eletrônico tomado como exemplo prático para a validação da simulação e desempenho térmico dos semicondutores GaN é um conversor Boost que processa uma potência elétrica de 100W, apresentado anteriormente por Duarte et al. (2018)(Figura 1). Esse conversor utiliza semicondutores GaN e opera numa frequência de comutação de 1MHz. Além disso o conversor Boost apresentado exibe uma alta eficiência, com máximo de 96%. Foi desenvolvido um modelo CAD 3D com base na placa de circuito impresso (PCB) construída pelo projetista do circuito no programa Altium Designer.

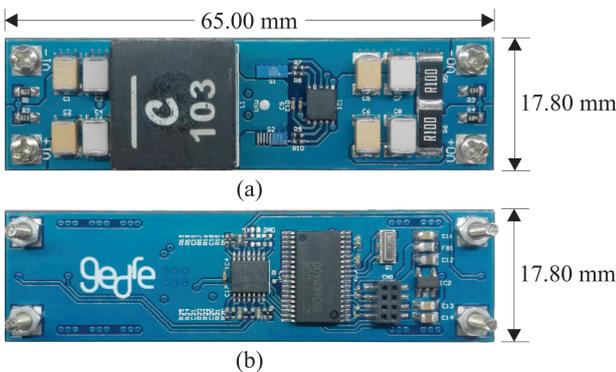


Figura 1. PCB do conversor Boost. Vistas superior (a) e inferior (b). Duarte et al. (2018).

É importante salientar que a geometria completa do dispositivo é bastante complexa e o desenvolvimento integral de todos os seus componentes, trilhas, conectores e outros poderiam causar dificuldades na solução do problema e maiores custos computacionais. Assim, cabe ao projetista fazer uma filtragem geral dos componentes geométricos de maior relevância visando simplificações geométricas.

O diagrama do circuito do conversor Boost utilizado é apresentado na Figura 2. É possível perceber que este opera como um conversor do tipo boost síncrono. Essa topologia de circuito é típica devido a sua simplicidade e alta eficiência. Conforme Duarte et al. (2018), os interruptores  $S_H$  e  $S_L$ , juntamente com o indutor  $L_I$  são responsáveis por mais de 80% das perdas no circuito. Assim, optou-se por desprezar os efeitos dos demais componentes para simplificar a geometria do circuito e consequentemente o custo computacional.

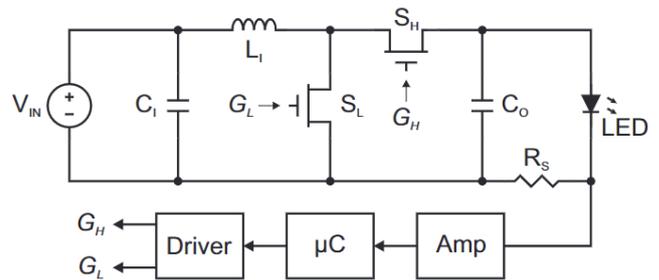


Figura 2. Diagrama conversor Boost. Duarte et al. (2018).

O transistor EPC2016C ( $S_H$ ) foi alocado para a substituição do diodo de roda livre no conversor boost. Esse transistor é basicamente o mesmo que o EPC2001C ( $S_L$ ), mas com metade da capacidade de manipulação de corrente (Efficient Power Conversion, 2019b). Essa escolha foi feita para evitar a subutilização do interruptor devido à corrente mais baixa no caminho da roda livre. Já o indutor  $L_I$  utilizado no projeto foi o XAL1510 de  $10\mu H$ .

Na Figura 3 são apresentados em detalhes os interruptores GaN utilizados. Uma das vantagens desses dispositivos é o seu tamanho reduzido. A densidade volumétrica de potência pode ser até  $100\times$  maior do que seus concorrentes de Si (Han and Sarlioglu, 2015).

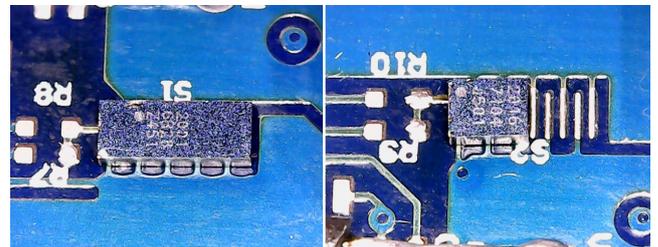


Figura 3. FET's GaN utilizados. A esquerda o EPC2001C com dimensões de  $4105\mu m \times 1635\mu m \times 815\mu m$  e a direita o EPC2016C com  $2106\mu m \times 1632\mu m \times 815\mu m$ .

Na Figura 4 são ilustradas as quatro camadas de cobre que a PCB possui. A placa possui outras três camadas intermitentes de material dielétrico FR4, sendo as camadas de cobre das extremidades com  $70\mu m$  de espessura e as centrais de  $35\mu m$ , separadas por  $263\mu m$  de FR4, completando ao todo  $1mm$  de espessura.

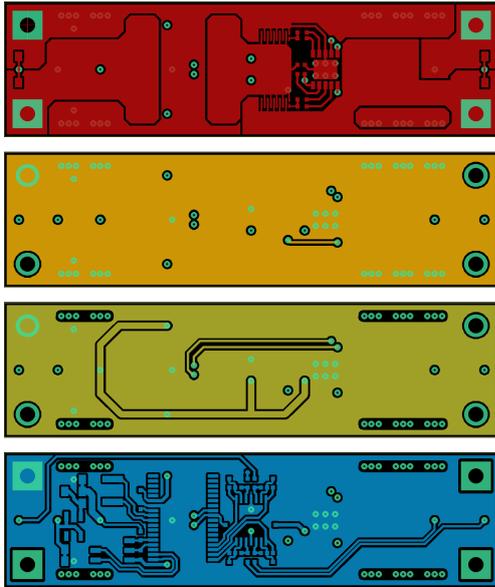


Figura 4. PCB do conversor Boost. Vistas das quatro camadas da PCB. Duarte et al. (2018).

Para a simplificação da geometria a ser simulada, apenas as trilhas que compõem o nó de comutação foram detalhadas. As demais trilhas da placa foram consideradas como planos sólidos de cobre, conforme apresentado na Figura 5. Como interface entre os terminais dos componentes e a placa, utilizou-se uma camada de solda (63Sn-37Pb) de  $10\mu\text{m}$  de espessura. Já para os componentes do circuito EPC2016C, EPC2001C e XAL1510 as dimensões foram obtidas nos datasheets dos fabricantes; Efficient Power Conversion (2019b), Efficient Power Conversion (2019a) e Coilcraft (2020) respectivamente. Posteriormente, será melhor anunciado as especificações dos materiais utilizados para cada um dos componentes até aqui mencionados.

Na Tabela 1 são exibidas as características dos materiais que compõem os componentes utilizados nas simulações.

Tabela 1. Características Gerais dos Materiais.

Materiais	Calor Específico [ $J/(kg \cdot K)$ ]	Condutividade Térmica [ $W/(m \cdot K)$ ]
Si - silício	700	148
63Sn-37Pb - solda	150	50
Cu - cobre	385	401
FR4 - dielétrico	950	0,45
Ar - $25^{\circ}C$	1004	261
Mn-Zn - ferrite	710	3,9
ZnO - SC-320	540	3,2
Al - alumínio	903	237

Devido o tamanho e a localização das interfaces em questão, elas são tão pequenas que o software não as gera de forma convencional. É o caso das interfaces entre o Ar e as bordas de elementos de espessura desprezível como o estanho usado nos conectores do circuito. Considerou-se então o calor dissipado nessas interfaces desprezível para a análise, modificando apenas a condutividade térmica das interfaces de junção dos semicondutores GaN de acordo com Worman and Ma (2011).

É importante salientar que o domínio envoltório do dispositivo ou ambiente deve ser criado no passo da descrição

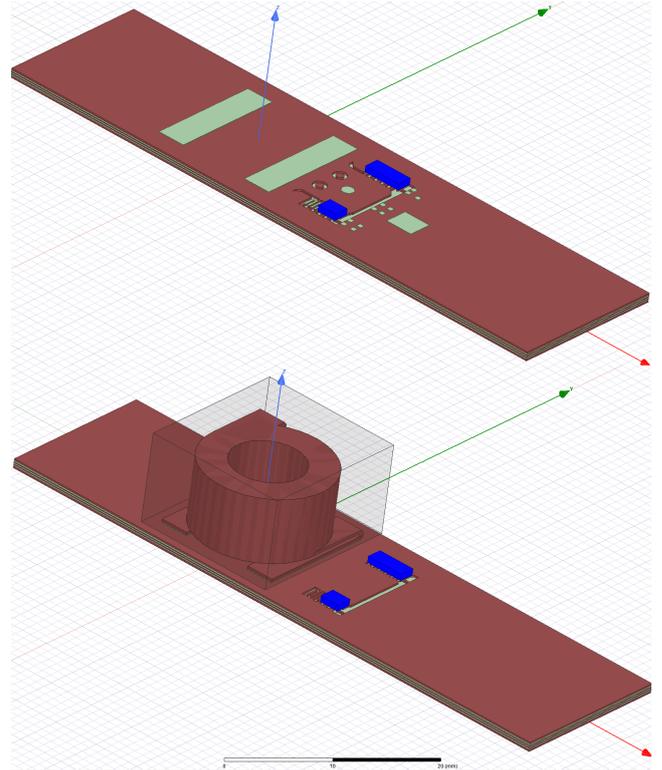


Figura 5. Geometrias para a validação dos componentes envolvidos na análise.

geométrica e especificado posteriormente como fluido ou sólido a ser utilizado. Criando as paredes da “caixa de ambiente” e suas aberturas (condições de contorno). No caso proposto foram nas partes superior e inferior. Mantendo a atenção para as interfaces do tipo fluido - sólido, pois nelas, como na borda das paredes, deve ser configurado o atrito que ocorre entre o fluido (Ar) e os sólidos em questão.

Para o caso em questão, foram definidas as potências dissipadas em cada elemento com base nos valores encontrados em Duarte et al. (2018) e as condições iniciais da simulação. Essas configurações serão exibidas no próximo capítulo juntamente com as propostas de arrefecimento para o conversor Boost utilizado.

Os modelos térmicos computacionais dos componentes foram obtidos através de ensaios experimentais dos mesmos. Aplicou-se em cada componente uma potência elétrica controlada em regime permanente e mediu-se seu comportamento térmico com auxílio de uma câmera térmica (Fluke Ti32). Posteriormente estes perfis foram comparados com os resultados de simulação e os modelos foram ajustados iterativamente até que se obtivesse boa correlação entre os resultados computacionais e os experimentais. Foi ajustado então para cada um dos perfis um refinamento aperfeiçoado de malha geométrica, denominado pelo software como “padrão da ordem em elemento linear”, este padrão elabora um número maior de elementos em escala linear dos maiores aos menores domínios da geometria geral do modelo em um tamanho pré-estipulado pelo projetista. O tamanho de borda do elemento inicial da malha que se adequou melhor ao projeto foi de  $12\text{mm}$  aumentando a precisão da simulação para um tamanho final mínimo de aproximadamente  $1,74\text{nm}$ .

### 3. PROPOSTAS DE MELHORIA NO ARREFECIMENTO

Aqui serão propostas diferentes configurações para o arrefecimento do conversor Boost. Serão quatro configurações para a validação da metodologia aplicada e duas configurações avançadas para melhor arrefecimento do circuito;

- (1) *Configuração 1*: validação dos FET's GaN;
- (2) *Configuração 2*: validação do Indutor;
- (3) *Configuração 3*: validação dos FET's GaN e Indutor;
- (4) *Configuração 4*: validação do encapsulante de silicone SC-320 em dissipador tubular de alumínio de 8cm;
- (5) *Configuração 5*: modelo avançado com SC-320 em dissipador tubular de alumínio de 23,5cm;
- (6) *Configuração 6*: modelo avançado com SC-320 e dissipador de alumínio projetado;

Essas configurações serão separadas nas duas subseções seguintes em configurações sem dissipador (configurações 1, 2 e 3) e com dissipador (configurações 4, 5 e 6).

#### 3.1 Configurações sem Dissipador

Dois ensaios experimentais foram necessários para obter modelos satisfatórios do sistema. No primeiro, apenas os transistores foram considerados. Já no segundo, apenas o indutor  $L_I$ . Conforme a Tabela 2, foi indicado ao software as potências consumidas pelos dispositivos, de acordo com os resultados obtidos através de ensaios práticos realizados para a validação dos componentes do circuito em questão.

Tabela 2. Potência aplicada aos dispositivos para a validação de projeto.

EPC2001C	EPC2016C	XAL1510
1,107W	612mW	1,465W

Posteriormente, foram utilizados os dados disponibilizados por Duarte et al. (2018) para a simulação térmica, que irá analisar o efeito de todos os elementos dissipadores de calor do circuito, conforme a Tabela 3. Na figura 6 é apresentado o resultado obtido pelas entradas descritas na Tabela 3.

Tabela 3. Potências reais do conversor Boost.

EPC2001C	EPC2016C	XAL1510
905mW	497mW	2,928W

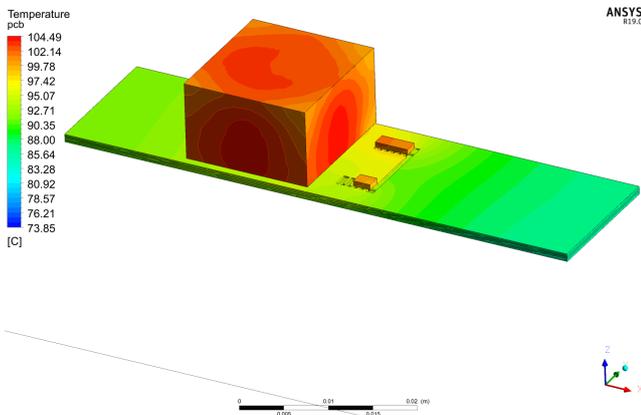


Figura 6. Resultados obtidos no simulador para a Configuração 3 utilizando os dados da Tabela 3.

Devido a alta frequência de comutação do conversor ele dissipará uma maior potência (Tabela 3), comparada ao ensaio experimental de validação dos componentes (Tabela 2), o qual uma corrente contínua de 10A foi injetada no indutor, obtendo uma potência consumida de 1,465W.

O gradiente de temperatura na placa de circuito impresso para os primeiros casos descritos no processo de “validação da solução” da Tabela 2 são apresentados nas Figuras 7 e 8, uma apresenta os resultados da simulação e ensaios experimentais para os FET's GaN e a outra para o indutor. Na parte superior da Figura 7, à esquerda está o transistor EPC2016C e à direita o EPC2001C, assim como na Figura 8 que apresenta a temperatura para todos os domínios envolvidos no caso de modelagem do indutor XAL1510.

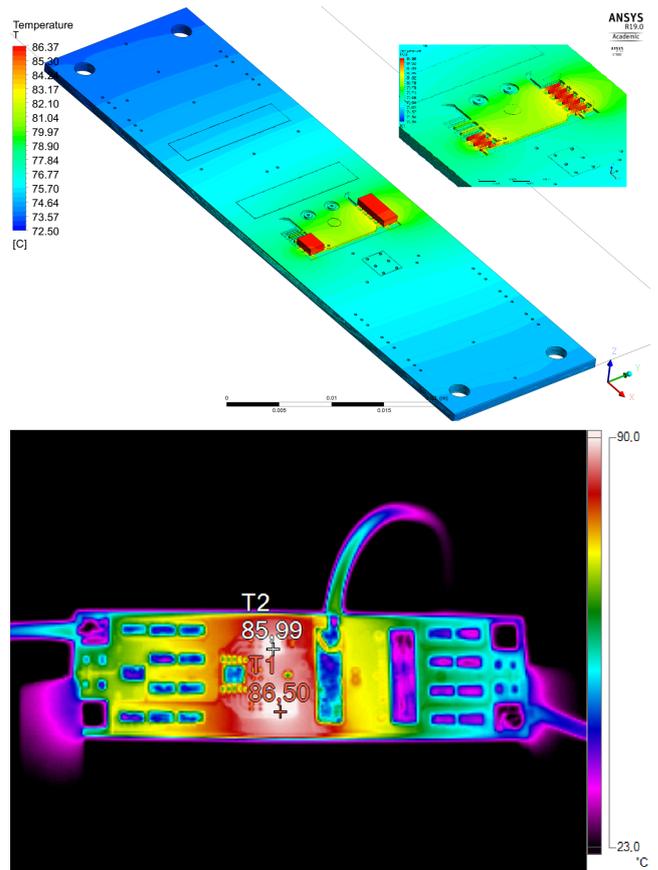


Figura 7. Resultados de validação obtidos no simulador e prática para a Configuração 1 (Tabela 2).

Verificado os resultados, percebeu-se que o transistor EPC2001C possui a temperatura de junção mais crítica entre os transistores do circuito, e que o indutor sofre mais perdas quando comportado em regime transiente. Cabe agora atualizar o modelo para adicionar melhorias na distribuição do gradiente de temperatura dos resultados apresentados na Figura 6.

#### 3.2 Configurações com Dissipador

Nesta etapa do trabalho são propostas novas configurações que satisfaçam as necessidades impostas no projeto até que se consiga resultados com melhor desempenho no arrefecimento do circuito (configurações 4, 5 e 6). Aqui

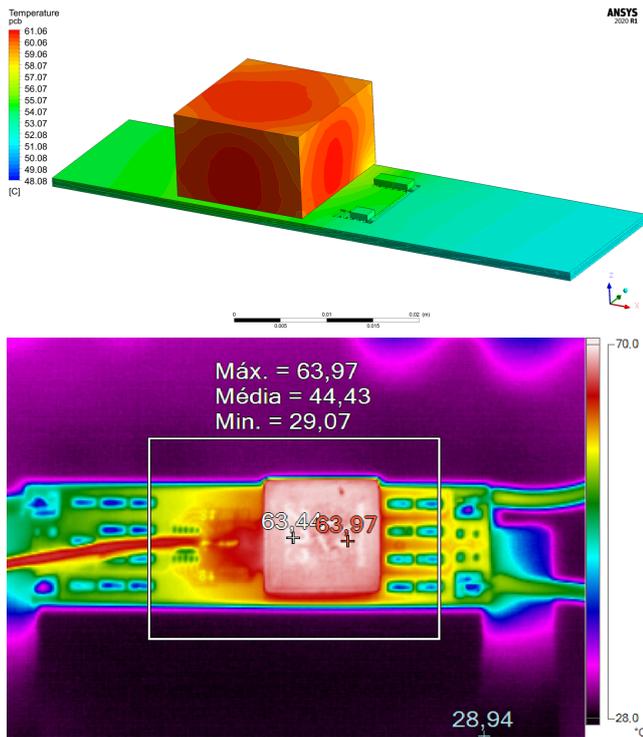


Figura 8. Resultados de validação obtidos no simulador e prática para a Configuração 2 (Tabela 2).

acrescentou-se uma nova geometria ao projeto para otimizar a transferência de calor empregando um encapsulante de silicone termicamente condutor Lord SC-320. Segundo Li et al. (2016) o material Lord SC-320 possui maior condutividade térmica ( $3,2W/(m \cdot K)$ ) comparado ao Stycast 2762 ( $1,37W/(m \cdot K)$ ) e por isso pode fornecer um melhor desempenho térmico ao dispositivo (Parker LORD, 2020), tornando esse material adequado para conduzir o calor gerado pelo conversor Boost ao dissipador. O primeiro modelo proposto é apresentado na Figura 9.

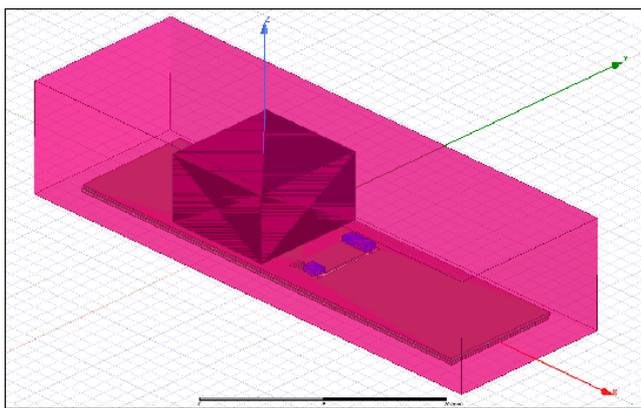


Figura 9. Geometria proposta utilizando SC-320 para o arrefecimento dos elementos envolvidos nas análises anteriores.

O modelo da Figura 9 foi proposto somente para a análise do comportamento térmico envolvendo o revestimento de silicone utilizado. Os resultados foram obtidos seguindo os mesmos passos descritos nos processos anteriores. Para este modelo, os resultados são apresentados na Figura 10.

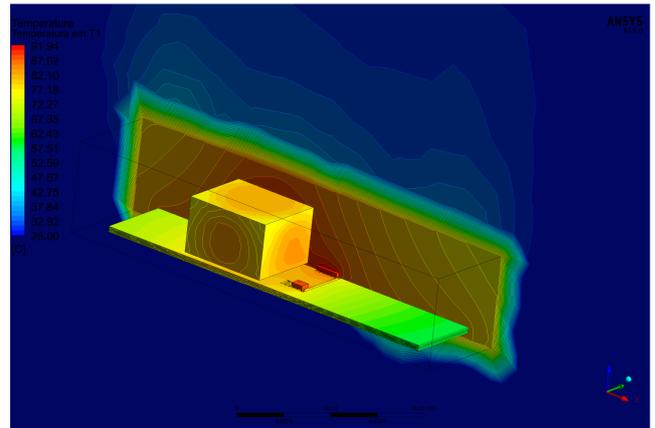


Figura 10. Resultados utilizando SC-320 para o arrefecimento dos elementos envolvidos da Figura 9.

Comparando as figuras 6 e 10 percebe-se que a temperatura máxima diminuiu aproximadamente  $12,5^{\circ}C$ . Embora este resultado seja melhor que a configuração 3, ainda não é suficiente. Desse modo, levando em consideração a prototipagem física para este caso, que se trata de um sistema de iluminação, foi utilizado como encapsulante um corpo tubular de alumínio comumente utilizado em lâmpadas LED's tubulares (Figura 11). Percebe-se que, para esse caso, o volume de SC-320 reduziu, o que diminui a área efetiva para a dissipação térmica das potências envolvidas (Tabela 3). Mas, em contrapartida, o encapsulante de alumínio possui alta condutividade térmica e calor específico (Tabela 1), facilitando a condução e dissipação do calor do dispositivo.

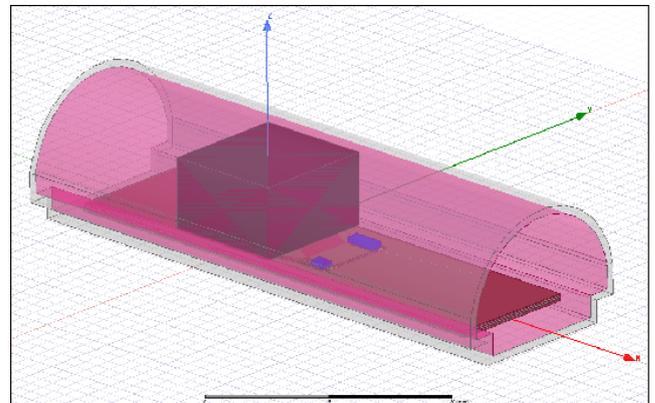


Figura 11. Configuração 4 proposta para o arrefecimento do dispositivo utilizando SC-320 em dissipador tubular de alumínio de  $8cm$ .

Cabe salientar que para o caso da Figura 11 a geometria do dissipador tubular de alumínio foi simplificada para uma melhor operação computacional da CAE. Esse dissipador, em seu modelo físico real, possui ranhuras específicas para melhor aderência e dissipação térmica e um suporte para o acoplamento de uma barra de LED's. Os resultados obtidos repetindo os processos da CAE para um corpo tubular de alumínio serrado em  $8cm$  de comprimento (Figura 11), são apresentados na Figura 12.

A diferença das temperaturas máximas entre as configurações 3 e 4 (Figuras 6 e 12) é de aproximadamente  $31,6^{\circ}C$ , o que satisfaz a condição segura de operação do dispositivo.

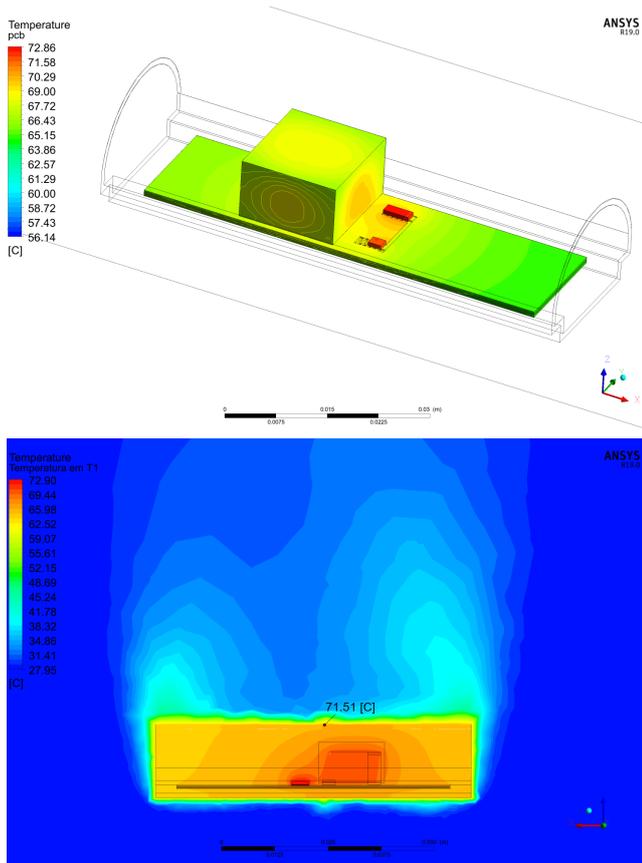


Figura 12. Resultados simulados da configuração 4.

A Figura 13 mostra a imagem térmica do modelo físico operando em suas devidas condições de acordo com o modelo previsto na Figura 12.

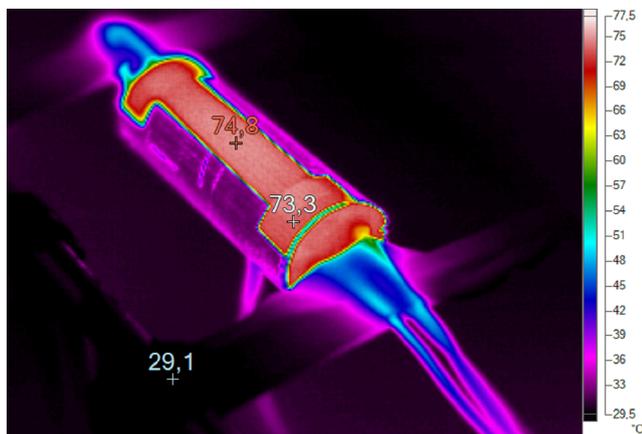


Figura 13. Ensaio térmico da configuração 4.

Devido a versatilidade da CAE foram elaboradas duas configurações avançadas para possíveis melhorias no arrefecimento do conversor Boost (configurações 5 e 6). Considerando que o dissipador tubular de alumínio utilizado na configuração 4 em sua dimensão real possui em média 235cm de comprimento. A primeira configuração avançada trata-se de um preenchimento de 10% desse dissipador com o encapsulante de silicone SC-320, ou seja, com o preenchimento no tubo de 23,5cm de SC-320 conforme a Figura 14. Isso corresponde a um aumento de 240% no volume de SC-

320 referente a configuração 4 (18,79cm<sup>3</sup> para 63,87cm<sup>3</sup>) proporcionando uma queda de 20,5°C comprada a essa configuração e uma queda total na temperatura máxima do conversor de 52°C (Figuras 6 e 14).

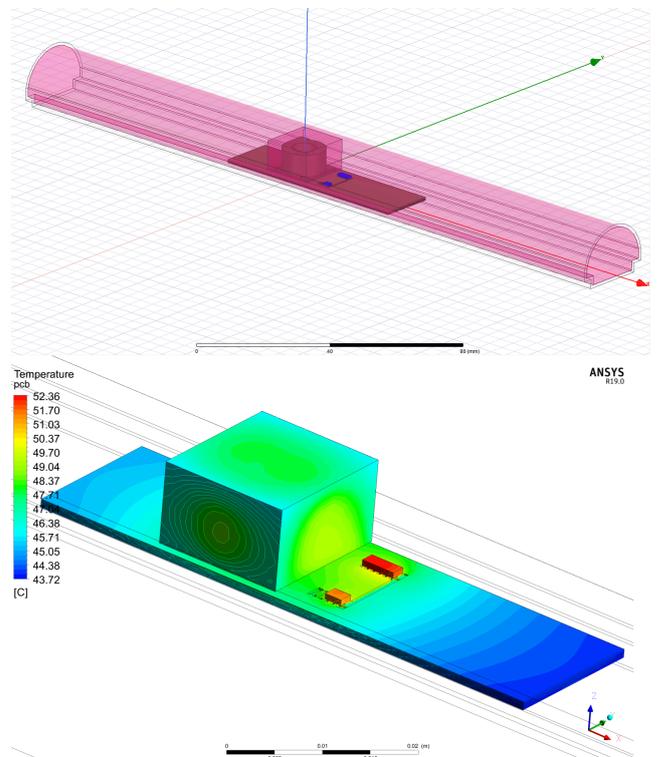


Figura 14. Configuração proposta para o arrefecimento do dispositivo utilizando SC-320 em dissipador tubular de alumínio de 23,5cm.

Independentemente da configuração 5 proporcionar um arrefecimento considerável do conversor Boost, essa aplica-se especificamente à lâmpadas LED do tipo tubular com 240cm de comprimento. Assim, para uma aplicação geral utilizando CAE, foi desenvolvido um dissipador de alumínio conforme a configuração 6 apresentada na Figura 15. Esse dissipador utiliza somente 51,7% de SC-320 comparado à configuração 4 ou 15,2% comparado à configuração 5, tornando assim a configuração 6 a mais econômica.

Em contrapeso às configurações anteriores, a configuração 6 possui um dissipador especificamente projetado para o circuito, mantendo o contato direto nas interfaces FET's GaN e dissipador, permitindo assim, um melhor arrefecimento dos dispositivos. Comparada à configuração 3 a configuração 6 proporcionou uma queda total na temperatura máxima do conversor de 58,57°C o que deverá satisfazer uma refrigeração térmica do dispositivo operando em condições climáticas de temperaturas elevadas.

Após o processo de solução o software gera os resultados e os apresenta de acordo com o desejado, seja em termos de temperatura, pressão, velocidade e outros, para quaisquer elementos envolvidos. Assim, para cada domínio pode-se obter medidas apuradas de temperatura que podem auxiliar no processo de avaliação. Na próxima seção será apresentado um comparativo apurado dos resultados das configurações vistas até então.

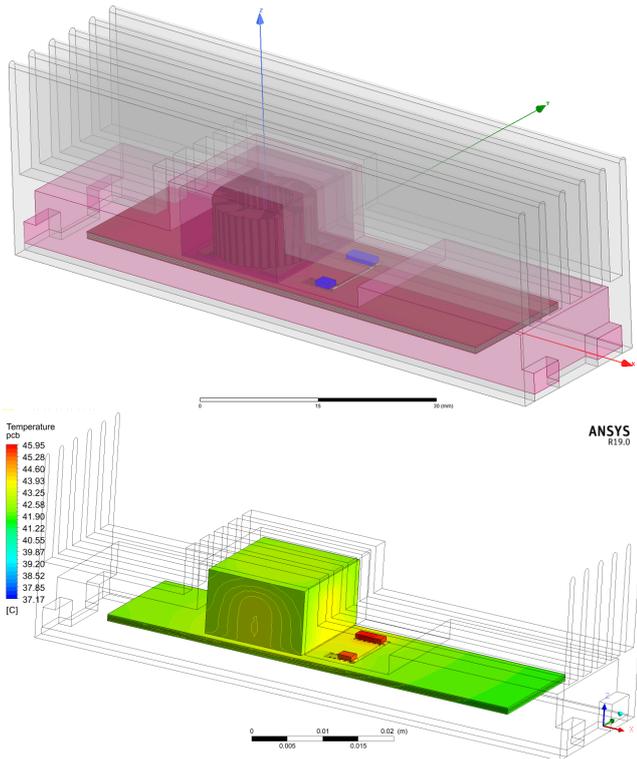


Figura 15. Configuração 6 proposta para o arrefecimento do dispositivo utilizando SC-320 em dissipador de alumínio

#### 4. ANÁLISE COMPARATIVA

Analisando as configurações descritas no capítulo anterior, percebeu-se uma queda de temperatura no conversor Boost de no mínimo 28,5% se comparada às temperaturas máximas das configurações 3 e 4. Os resultados de todas as configurações de validação (configurações 1 a 4) são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4. Resultados de Validação.

Modelos de Referência	Temp. Máxima Medida (°C)	Temp. Mínima Medida (°C)	Temp. Máxima Simulada (°C)	Temp. Mínima Simulada (°C)	Erro (%)
Config. 1	86,17	24,27	86,37	25,00	1,575
Config. 2	63,97	29,25	61,06	30,07	3,746
Config. 3	105,00	28,00	104,52	27,78	0,624
Config. 4	74,80	28,10	71,51	27,95	2,576

O erro médio da modelagem do indutor é maior do que qualquer outro. Isso se dá, uma vez que o modelo utilizado é aproximado devido o fabricante não fornecer detalhes sobre certos aspectos construtivos do componente.

O erro médio total foi calculado da seguinte maneira:

$$\%erro_{mdio} = \sum_{n=1}^N \frac{|Tm_n - Ts_n|}{Ts_n} \times \frac{100}{N} \cong 2,13\% \quad (1)$$

onde  $N$  é o número de erros calculados,  $Tm$  é a temperatura medida e  $Ts$  é a temperatura simulada para todos os modelos de referências da Tabela 4 resultando em aproximadamente 2,13%.

As temperaturas médias dos componentes caloríficos do circuito (FET's GaN e Indutor) utilizados nas configu-

rações de arrefecimento são apresentadas na Figura 16. Constatou-se nela uma redução na temperatura máxima dos semicondutores de aproximadamente 27,12°C utilizando o dissipador de calor tubular de 8cm. Além disso, se empregada a configuração avançada "SC-320 em dissipador de alumínio" é prevista uma queda na temperatura máxima de aproximadamente 56,2% no conversor Boost.

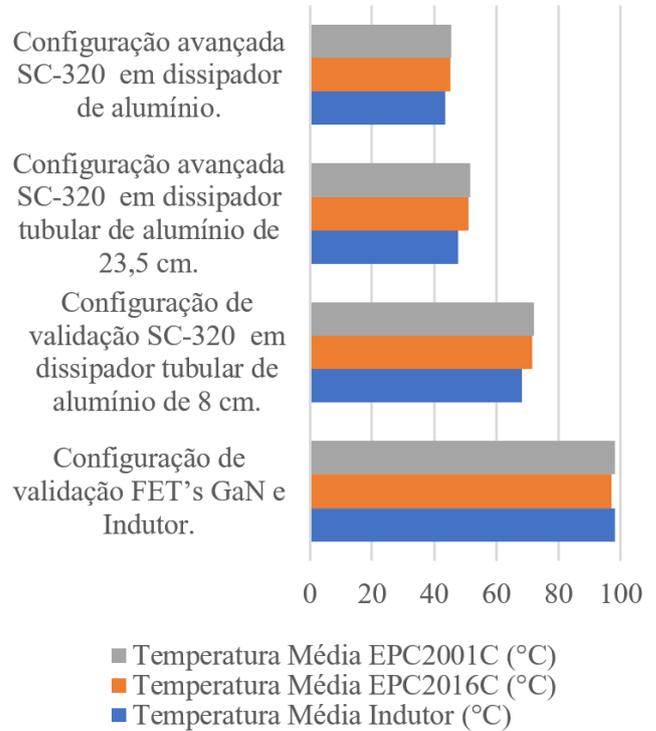


Figura 16. Comparativo das médias de temperaturas nas junções dos FET's GaN e Indutor das configurações de 3 a 6.

A uniformidade de temperatura da PCB de todas as configurações vistas são apresentadas pelas medidas de temperaturas máximas, mínimas e médias no gráfico da Figura 17. Notou-se que o resultado das combinações dos componentes caloríficos do circuito apresentou a configuração de maior temperatura, pois essa não possui nenhum meio de arrefecimento eficiente senão a placa de circuito impresso. Além do mais, essa configuração possui a maior diferença de temperatura entre seus pontos máximos e mínimos comparada as configurações propostas para o arrefecimento do conversor (menor uniformidade de temperatura na PCB).

Examinou-se através dos dados de simulação e resultados práticos da Figura 17 que a diferença de máximos e mínimos de temperatura, bem como as temperaturas médias das configurações, diminuíram em 36,7% e 47,7% respectivamente. Isso se dá devido a elevada condutividade térmica do encapsulante SC-320 que distribui de maneira mais uniforme a temperatura pelo conversor Boost.

Contudo as configurações 5 e 6 foram as que apresentaram melhor desempenho para o arrefecimento do conversor Boost, diminuindo significativamente a temperatura de junção dos semicondutores GaN e, conseqüentemente, de todo o dispositivo.

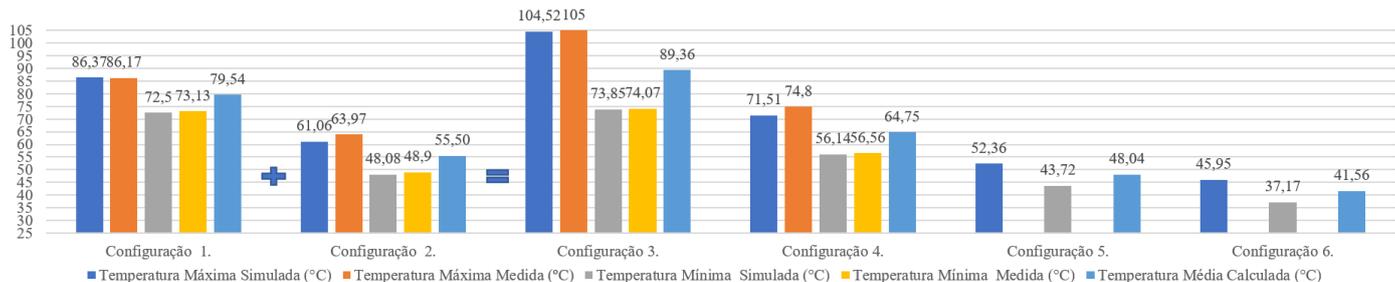


Figura 17. Gráfico comparativo das temperaturas máximas, mínimas e média para todos os domínios da PCB.

## 5. CONCLUSÃO

Neste artigo, uma metodologia baseada em CAE foi utilizada para o projeto computacional do sistema de arrefecimento de conversores eletrônicos com dispositivos semicondutores de nitreto de gálio (GaN). A CAE possui uma infinidade de aplicações, pois em sua topologia geral, a separação dos processos em etapas fundamentais, faz com que ele seja dinâmico e adaptativo ao problema. Assim, esse permite o acesso e a alteração independente ou não de cada um dos estágios envolvidos. Para o caso do conversor Boost utilizado foram necessárias diversas alterações na geometria, potência, condições dinâmicas do ambiente e outras. Essas alterações foram realizadas sem a necessidade de prototipagens do dispositivo operando em determinadas condições.

Verificou-se através da comparação dos resultados experimentais e de simulações um erro médio total de 2,13% e uma redução na temperatura dos semicondutores de aproximadamente 27,12°C utilizando o dissipador de calor proposto para a validação das simulações. E ainda, foram expostos outros dois modelos utilizando CAE que poderão proporcionar um arrefecimento dos semicondutores de aproximadamente 47,67°C para a configuração proposta com o encapsulante de silicone SC-320 em dissipador tubular de 27,5cm e 53°C para a configuração avançada SC-320 em dissipador de alumínio projetado.

Assim, devido à sua acurácia, a CAE se mostra atrativa para a avaliação de conversores antes de sua implementação prática. Além disso, semicondutores GaN ainda apresentam um preço mais elevado em comparação com MOSFETs de silício tradicionais, o que inviabiliza a fabricação de diversos protótipos para teste. Portanto, a simulação com a CAE promove a redução dos custos de prototipagem e torna o desenvolvimento de conversores eletrônicos mais rápido e otimizado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a sociedade brasileira por proporcionar uma educação pública e de qualidade. A Universidade Federal de Santa Maria, a Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do RS (FAPERGS), o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq proc 425794/2018-0, bem como ao grupo de pesquisa GEDRE - Inteligência em Iluminação, ao laboratório multiusuário de simulações computacionais do Instituto de Redes Inteligentes (INRI) e as empresas Eletro Zagonel Ltda e EPCOS Brasil pelo suporte no desenvolvimento do trabalho.

## REFERÊNCIAS

- Alves Filho, A. (2018). *Elementos Finitos—A base da tecnologia CAE*. Editora Saraiva.
- Coilcraft (2020). Shielded power inductors xal1510. *Datasheet 947-1*. URL <https://www.coilcraft.com/pdfs/xal1510.pdf>.
- Dede, E.M., Wang, C.M., Liu, Y., Schmalenberg, P., Zhou, F., Shin, J.W., and Ishigaki, M. (2017). Electrothermal circuit design with heat flow control—synchronous buck converter case study. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 8(2), 226–235.
- Duarte, R.R., Pereira, G.G., Dalla Costal, M.A., Barriquello, C.H., and Alonso, J.M. (2018). Off-grid commercial led driver optimization using gan transistors. In *2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)*, 1–7. IEEE.
- Efficient Power Conversion (2019a). Epc2001c - enhancement mode power transistor. *eGaN FET datasheet*. URL [https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/epc2001c\\_datasheet.pdf](https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/epc2001c_datasheet.pdf).
- Efficient Power Conversion (2019b). Epc2016c - enhancement mode power transistor. *eGaN FET datasheet*. URL [https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/epc2016c\\_datasheet.pdf](https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/epc2016c_datasheet.pdf).
- Han, D. and Sarlioglu, B. (2015). Deadtime effect on gan-based synchronous boost converter and analytical model for optimal deadtime selection. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(1), 601–612.
- Hughes, T.J. (2012). *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Courier Corporation.
- Li, H., Klontz, K.W., Ferrell, V.E., and Barber, D. (2016). Thermal models and electrical machine performance improvement using encapsulation material. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(2), 1063–1069.
- Lidow, A., De Rooij, M., Strydom, J., Reusch, D., and Glaser, J. (2019). *GaN transistors for efficient power conversion*. John Wiley & Sons.
- Parker LORD (2020). Cooltherm sc-320 thermally conductive silicone encapsulant. *Safety Data Sheet*.
- Worman, J. and Ma, Y. (2011). Thermal performance of epc egan fets. *Application Note: AN011, Efficient Power Conversion Corporation (EPC)*.
- Yu, C., Labouré, É., and Buttay, C. (2015). Thermal management of lateral gan power devices. In *2015 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP)*, 40–43. IEEE.