

Comparativo Entre Conversores da Família Boost com Elevado Rendimento para Aplicações em Células a Combustível

Mateus José Tiburski, Edemar O. Prado, Hamiltom C. Sartori e José Renes Pinheiro
Grupo de Eletônica de Potencia e Controle (GEPOC)
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, RS, Brasil

Email: mateustiburski94@gmail.com, eo.prado@hotmail.com, hamiltomsar@gmail.com, jrenes@gepoc.ufsm.br

Resumo—Esse trabalho aplica metodologias de otimização em dois conversores da família *Boost*, o *Boost* Convencional e o *Boost Cascaded*, buscando analisar comparativamente seus rendimentos, volumes e custos, aplicados a elevação da tensão de uma célula a combustível para um barramento CC. As metodologias, já consolidadas, realizam a varredura de parâmetros que estão diretamente ligados à pontos importantes de projeto, como: frequência de chaveamento, ondulação de corrente no indutor, densidade de corrente no condutor e tensão intermediária do conversor *Boost Cascaded*. Após expor os métodos de otimização das duas topologias, resultados comparativos em relação ao rendimento, volume e custo são apresentados. Como resultado, os conversores apresentam soluções ótimas nos pontos supracitados, entretanto, os resultados apontam o uso do conversor *Boost* Convencional para aplicação. Uma vez que o número elevado de componentes do conversor *Boost Cascaded* restringem a obtenção de elevado rendimento, baixo volume ou custo em comparação ao *Boost* Convencional.

Palavras-Chaves – Conversor *Boost* Convencional, Conversor *Boost Cascaded*, Otimização, Rendimento e Volume.

I. INTRODUÇÃO

A escassez dos combustíveis fósseis e preocupações ambientais, como: aquecimento global, poluição do ar, precipitação ácida e emissões radioativas levaram a evolução dos meios de geração de energia elétrica sem denegrir o meio ambiente. Dentre os meios, destaca-se o aumento no fornecimento de energia através de fontes renováveis ou limpas.

Recentemente, a geração de energia por meio de fontes renováveis vem despertando maior interesse aos pesquisadores e engenheiros. Entre estas, aplicações com células a combustível (CaC) têm recebido grande atenção nas pesquisas, pois relacionam geração eficiente com baixo impacto ambiental [1].

Este aumento na geração de energia através de fontes renováveis alavancou o uso de conversores estáticos que necessitam de elevados ganhos de tensão. Os níveis de tensão provenientes das células a combustível tornam necessário a utilização de conversores que conectam a fonte geradora ao barramento de alta tensão, adequando as grandezas elétricas e protegendo-as contra variações de carga ou elevadas ondulações de corrente/tensão que degradam ou prejudicam seu desempenho [2].

Na busca por altos ganhos de tensão, um número grande de topologias de conversores CC-CC foram propostos para a aplicação apresentada na Fig. 1. Em sua maioria, conversores de alto ganho não isolados são empregados para obter alto rendimento aliado ao baixo custo e esses podem ser classificados através do tipo de indutor utilizado: acoplado e não acoplado [3].

Um número grande de conversores com indutor acoplado estão sendo propostos [4]. São similares aos conversores isolados, onde o aumento na relação de espiras do indutor permite um elevado ganho de tensão [4]. Em contrapartida, seu volume é um problema para o desenvolvimento de um conversor compacto e a energia armazenada pela indutância de dispersão ocasiona altos picos de tensão, aumentando as perdas de chaveamento nos interruptores e problemas ligados à interferência eletromagnética (EMI) [4], [5]. Algumas estratégias para contornar esses problemas foram desenvolvidas com o custo de componentes adicionais [6].

Os conversores que utilizam indutores não acoplados podem obter elevados ganhos de tensão com componentes magnéticos reduzidos [3]. A exemplo disso, destacam-se os conversores da família *boost*, como: o *boost* convencional, estrutura em cascata [7], *Boost* quadrático [8], *boost* intercalado [9], *Dual boost* [10], entre outros. Além destes, conversores com capacitores chaveados são frequentemente utilizados para aumentar o ganho de tensão foram discutidos em [11]. No entanto, o número de elementos ativos e passivos do conversor é acrescido juntamente com o volume e a complexidade do sistema [3].

Para a análise desse artigo, opta-se por dois conversores da família *Boost*: o conversor *Boost* em cascata ou também conhecido como *Boost Cascaded*, e o conversor *Boost* convencional, conforme Fig. 1. O conversor *Boost* Convencional é a topologia mais simples e utilizada quando busca-se elevar uma tensão a um nível maior que a sua fonte de entrada [12]. Seu ganho estático é calculado por:

$$M_{conv} = \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

sendo D a razão cíclica. Por outro lado, o conversor *Boost*

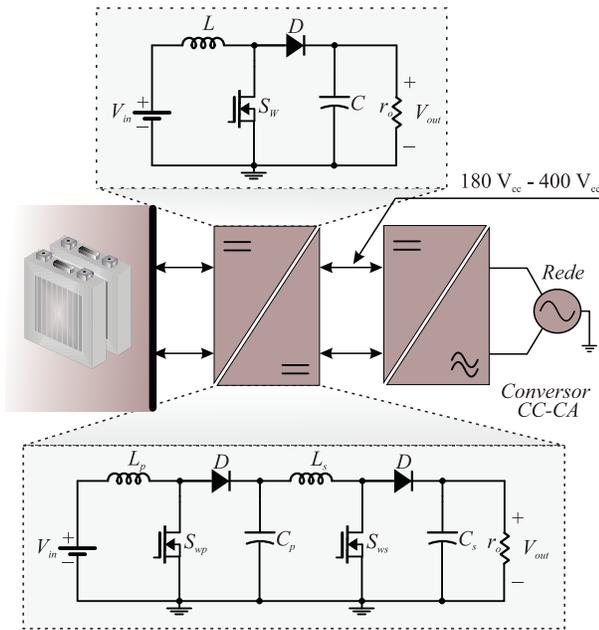


Figura 1: Diagrama do sistema proposto para a análise.

Cascaded é formado por dois conversores *Boost* convencionais ligados em cascata, proporcionando elevado ganho estático. Logo, seu ganho estático é calculado como:

$$M_{cascaded} = \frac{1}{(1 - D)^2} \quad (2)$$

Para analisar os dois conversores, metodologias de projetos otimizados serão aplicadas. Estas verificaram através de um determinado conjunto de componentes e varredura de parâmetros dos conversores qual topologia garanta menores perdas ou máximo rendimento, menor volume e custo na elevação de tensão da CaC a um barramento CC.

II. METODOLOGIA DE PROJETO DE CONVERSORES DA FAMÍLIA BOOST

As metodologias de projetos são baseadas e foram apresentadas nos trabalhos [13]–[16] para o *Boost* Convencional e [16], [17] para o *Boost Cascaded*. Para o *Boost* Convencional o método faz a seleção da melhor solução através do menor volume ou maior rendimento ou densidade volumétrica de potência. O algoritmo, desenvolvido em Matlab®, varre em uma ampla faixa os pontos de operação do conversor, como: frequência de chaveamento (f_s), ondulação de corrente no indutor (ΔI_L) e densidade de corrente no condutor (J). Estes três parâmetros variam de um ponto mínimo a um ponto máximo. Ao fim, após projetar e estimar as perdas e volumes de todos os componentes, o método calcula o volume e rendimento total e seleciona a melhor solução ou ponto de operação, conforme apresenta o fluxograma de projeto para o *Boost* convencional na Fig. 2.

No conversor *Boost Cascaded*, a metodologia de projeto é similar a apresentada para o conversor *Boost* Convencional, baseia-se em um algoritmo matemático, que estima as perdas

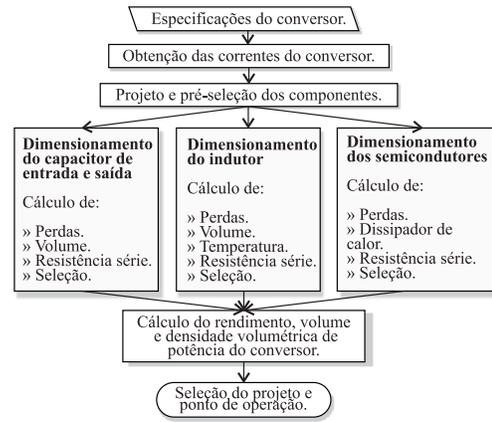


Figura 2: Fluxograma do algoritmo proposto para o conversor *Boost* Convencional.

e o volume presentes nos componentes. Este algoritmo varre além dos pontos citados acima, a tensão intermediária presente entre os dois estágios (V_{int}). Estes quatro parâmetros estão diretamente ligados ao conversor, facilitando a análise do melhor ponto de operação que garanta reduzidas perdas e menores volumes. O fluxograma do algoritmo proposto em [17] é apresentado na Fig. 3. Conforme a figura, são definidas as especificações de entrada do conversor, como: a potência fornecida pela célula combustível (P_{in}), as faixas de operação dos pontos supracitados ($f_s @ \Delta I_L @ J @ V_{int}$), temperatura ambiente (T_{amb}), temperatura de junção (T_j), número de chaves e capacitores em paralelo (N_s , N_c , respectivamente), ondulação de tensão nos capacitores (ΔV_{int} , ΔV_{out}), tensão de saída do barramento CC (V_{out}), número de harmônicos considerados na reconstrução das formas de onda de corrente, fator de utilização da área da janela, parâmetros da CaC e núcleos empilhados.

Além do mais, como mostra a Fig. 3, a tensão intermediária é variável. Logo, cada estágio do conversor é projetado individualmente, conforme apresentado para o conversor *Boost* Convencional na Fig. 2. Primeiramente, é definida a corrente e a tensão da CaC e, após, as demais correntes de cada componente do conversor pela série de Fourier. Posteriormente, realiza-se o projeto do indutor e estimação de suas perdas e volume, conforme [18]. Além disso, calculam-se as perdas dos semicondutores presentes no banco de dados, projeta-se seus respectivos dissipadores de calor e seleciona-se a melhor combinação que resulte em menores perdas ou volume. Para manter a ondulação de tensão definida nos dois estágios, projeta-se o capacitor e estimam-se suas perdas e volume. Ao final, para cada ponto de operação, os projetos de cada componente são somados e então seleciona-se a solução ou ponto de operação que apresente maior rendimento ou menor volume, conforme já exposto em [13], [14], [16], [17].

III. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os parâmetros de projeto dos conversores *boost* são apresentados na Tab. I. Para a análise é considerada uma potência

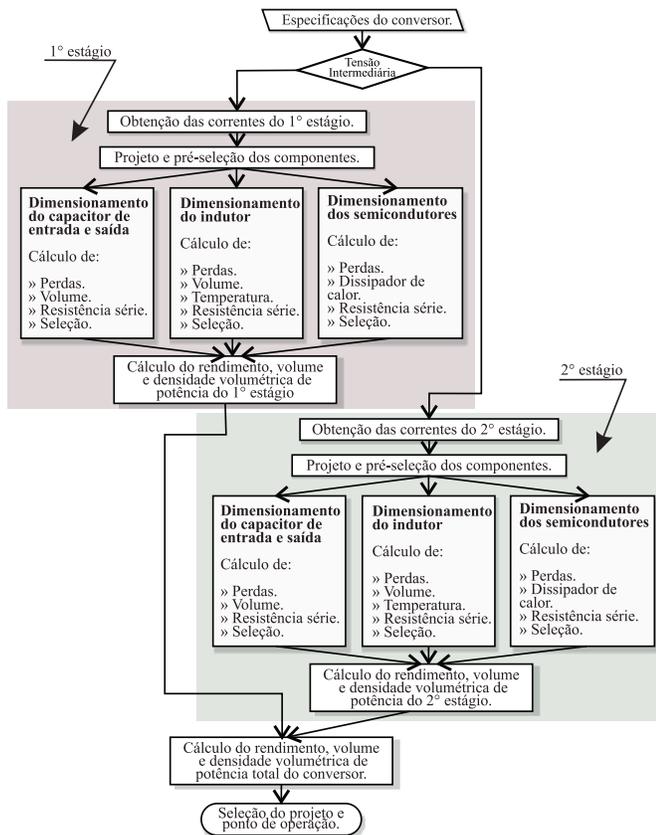


Figura 3: Fluxograma do algoritmo proposto para o conversor *Boost Cascaded*.

de entrada de 1 kW (50V, 20A) e tensão de saída para o barramento CC de 400 V. O banco de dados é formado por núcleos de tecnologia *Powder* da fabricante *Magnetics*[®], por capacitores da *TDK group*[®], por semicondutores com tecnologia *Silicon Carbide*, Silício e super-junção e dissipadores, responsáveis pela transferência de calor dos semicondutores, da fabricante *HS* dissipadores.

Após expor as metodologias dos dois conversores da família *Boost* para aplicações com elevado ganho de tensão aplicados a uma célula a combustível, esta seção busca observar de forma geral seus desempenhos em relação ao rendimento, volume e custo, sendo este, o valor relativo aos componentes do conversor sem levar em consideração a placa de circuito impresso (PCB) e o circuito de acionamento.

Na Fig. 4 é apresentado um comparativo entre os conversores em relação as soluções ótimas em rendimento e densidade volumétrica de potência, junto as curvas de Pareto. Sendo essa, a curva aproximada das melhores soluções para a aplicação. Dentre os projetos apresentados na Fig. 4, existe um conjunto de soluções que possuem vantagens em relação ao rendimento, mas que não são melhores em densidade volumétrica de potência ou vice-versa. Portanto, projetos com alto rendimento e alta densidade de potência foram encontrados para o conversor *Boost* convencional.

Já para o conversor *Boost Cascaded*, os projetos apresen-

Tabela I: Parâmetros de projeto do conversor.

Parâmetros	Valor
Potência de entrada	1000 W
Tensão de entrada	45 a 65 V [19]
Tensão de saída	400 V
Frequência	10 a 100 kHz, passo 5 kHz
Ondulação de corrente	5 a 300%, passo 5%
Tensão intermediária	100 a 380, passo 20%
Diodos	IDW40G65C5 IDW30G65C5 IDW20G65C5 15ETH06 IPW60R017C7
Chaves	IPB65R045C7 SCT3022AL XFX90N60X High Flux (HF)
Núcleos	Molypermalloy (MPP) Kool Mμ
Número de componentes em paralelo	$N_c = 1$ a 4 $N_{sw} = 1$ a 4
R_{cac}	0,832 Ω
R_{ohm}	0,18 Ω
C_{act}	0,07 F
Capacitor (in)	22 a 680 μF
Capacitor (Out)	2.2 a 1500 μF
Núcleos empilhados	1 a 3
ΔV_{out}	1%
Numero de harmônicos (n)	20
V_{gate}, R_{gate}	15 V, 10 Ω
Temperatura ambiente	25°C
Temperatura máxima	100°C
Fator de preenchimento do núcleo	40%

taram reduzidas densidades de potência decorrentes do alto volume dos dois indutores. Com a análise da Fig. 4 é possível observar que o conversor *Boost* convencional apresenta melhores soluções em rendimento e volume do que o conversor *Boost Cascaded*. Porém, há pontos em baixa densidade volumétrica de potência, onde o conversor *Boost Cascaded* possui rendimentos superiores ao *Boost* Convencional.

A adição de um segundo estágio ao conversor traz um número maior de componentes, o que reduz a densidade volumétrica de potência e o rendimento associado a um maior custo do conversor, Fig. 5, tornando seu uso não vantajoso para os métodos de seleção expostos pelas metodologias.

Outro fator importante na otimização de conversores é o custo de implementação da topologia. Na Fig. 5 são esboçados as soluções ótimas em rendimento, levando em consideração o custo do projeto (em dólar) para as três tecnologias de materiais magnéticos. Nessa figura, as soluções com menor valor são obtidas para o material magnético *Kool Mμ* para ambos os conversores. O conversor *Boost* convencional possui projetos com menor custo relativo em relação ao conversor *Boost Cascaded* nas regiões de maior eficiência, devido ao menor número de componentes. O material *Molypermalloy* mostrou-se mais eficiente nas soluções apresentadas na Fig. 4, porém seu custo é superior aos demais analisados, demonstrando que as soluções com maior eficiência estão atreladas a um maior custo.

A proximidade das soluções custo/rendimento estão relacio-

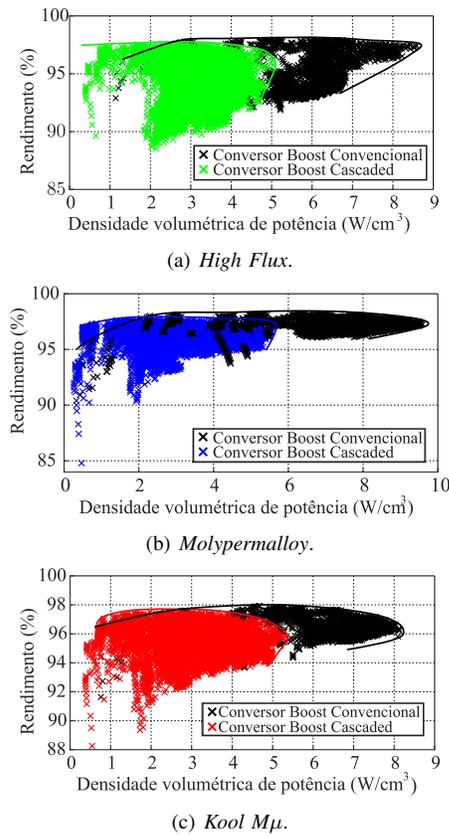


Figura 4: Comparativo entre as soluções ótimas para o conversor *Boost* convencional e *Boost Cascaded*.

onadas ao número elevado de chaves em paralelo selecionadas pela metodologia e ao indutor ser praticamente o único elemento a contribuir para variação no custo do projeto. Além disso, as soluções com custo alto estão associadas diretamente com o ponto de operação do conversor. Por exemplo, em menores ($f_s @ \Delta I_L @ J$) resultam em projetos com grandes volumes magnéticos, proporcionando um aumento no custo total do conversor. Este crescimento é evidente principalmente para o núcleo *Molypermalloy* cujo o valor deste material é superior aos demais núcleos magnéticos observados.

A Tab. II apresenta um comparativo das melhores soluções em rendimento para o conversor *Boost* Convencional. A tecnologia de semicondutores para as soluções selecionadas são as mesmas, bem como, o número de capacitores em paralelo na saída do conversor (C_{out}). A ondulação de corrente para as três soluções estão abaixo de 60%, não necessitando a utilização de capacitores na entrada (C_{in}), pois esta ondulação em alta frequência não afetará a vida útil da célula a combustível conforme apresentado em [20]. Além disso, são apresentados os volumes, perdas e a densidade volumétrica de potência (ρ) das soluções. Nestes resultados, o material MPP apresenta maior rendimento, seguidos pelo HF e *Kool M μ* .

As perdas percentuais resultantes das soluções expostas na Tab. II são apresentadas na Fig. 6. O maior percentual de perdas são provenientes do indutor, pois suporta toda a

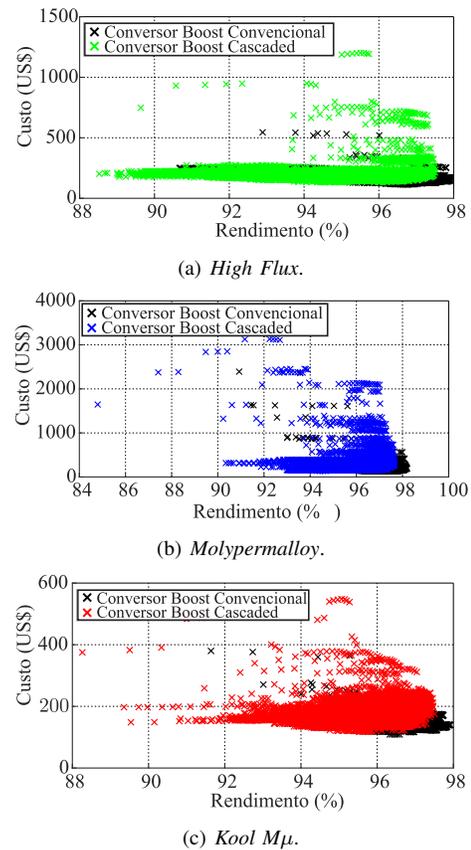


Figura 5: Comparação entre o custo relativo aos componentes dos dois conversores.

corrente da CaC, e pela chave, devido à elevada razão cíclica resultante do alto ganho da aplicação, o que resulta em maiores perdas por condução.

Os projetos com máximo rendimento do conversor *Boost*

Tabela II: Comparativo de projetos ótimos selecionados para o conversor *Boost* Convencional.

Parâmetros	Valores		
	<i>Molypermalloy</i>	<i>High Flux</i>	<i>Kool Mμ</i>
Tecnologia			
η (%)	98,19	97,93	97,92
Volume (cm ³)	145,16	170,65	217,9
N_s	4	4	4
Perdas totais (W)	18,0428	20,6817	20,7358
ρ (W/cm ³)	6,8884	5,8601	4,588
f_s (kHz)	24	20	18
ΔI_L (%)	60	30	55
D	0,877	0,878	0,878
J (W/cm ²)	300	300	300
Indutância (μ H)	0,14957	0,35881	0,21746
N $^\circ$. de espiras	36	90	63
Núcleo	55617	58907	77735
Condutor	12-20AWG	10-19AWG	8-18AWG
C_{in}	-	-	-
C_{out}	4-47 μ F	4-47 μ F	4-47 μ F
Interruptor	IPW60R017C7	IPW60R017C7	IPW60R017C7
Diodo	IDW40G65C5	IDW40G65C5	IDW40G65C5

Tabela III: Comparativo de projetos ótimos selecionados para o conversor *Boost Cascaded*.

Parâmetros	Valores					
	<i>MPP</i>		<i>HF</i>		<i>Kool Mμ</i>	
Tecnologia						
f_s (kHz)	10		15		10	
ΔI_L (%)	70		30		80	
J (A/cm ²)	300		300		300	
V_{int} (V)	380		380		380	
η_{tot} (%)	97,667		97,517		97,50	
Volume total (cm ³)	494,32		397,15		507,28	
ρ (W/cm ³)	2,02		2,517		1,97	
Estágio	1º	2º	1º	2º	1º	2º
η_{est} (%)	97,98	99,689	97,851	99,667	97,83	99,672
Volume (cm ³)	265,44	229,03	225,61	171,53	263,27	244,01
Perdas (W)	20,19	3,13	21,49	3,334	21,63	3,27
Razão cíclica	0,8684	0,05	0,8684	0,05	0,8684	0,05
Indutância (mH)	0,31015	1,0314	0,4824	1,604	0,2713	0,9025
Nº. de espiras	73	153	80	115	71	115
Núcleo	55735	55102	2-58867	2-58867	77735	2-77908
Condutor	4-14AWG	3-14AWG	6-16AWG	4-16AWG	4-14AWG	3-14AWG
C_{in} (μF)	4-22	-	-	-	4x22	-
C_{out} (μF)	4-47	2-47	4-47	2-47	4-47	2-47
N_s	4	1	4	1	4	1
Interrupor	chave ¹	chave ²	chave ¹	chave ²	chave ¹	chave ²
Diodo	diodo ¹	diodo ²	diodo ¹	diodo ²	diodo ¹	diodo ²

diodo¹ ⇒ IDW40G65C5. diodo² ⇒ IDW20G65C5.
 chave¹ ⇒ IPW60R017C7. chave² ⇒ IPW65R045C7.

Cascaded junto a um comparativo entre as diferentes tecnologias de materiais magnéticos são demonstradas na Tab. III. Nesta aplicação, os pontos de operação selecionados apontam para regiões em que os dois estágios conciliam o maior rendimento. Entretanto, a metodologia ao buscar maior rendimento seleciona componentes com reduzidas perdas e aliada ao paralelismo de chaves faz com que a tensão intermediária escolhida esteja no limite pré-definido para varredura. Esta escolha demonstra que a utilização do conversor *Boost Cascaded*

visando altos rendimentos, através do uso de tecnologias com alto desempenho, tenha uma tendência natural a operar com um único estágio, isto é, tende a se equiparar ao conversor *Boost* convencional.

O primeiro estágio do conversor, por processar toda a corrente fornecida pela célula a combustível, possui maior esforço nos componentes em relação ao segundo. Consequentemente, um menor rendimento é verificado nesse estágio. O MPP apresenta melhor desempenho em relação ao rendimento aos demais núcleos magnéticos. No entanto, sua densidade volumétrica de potência é menor que ao material *High Flux*, pois este apresenta maior frequência de chaveamento, resultando em menor volume no indutor.

A Fig. 7 apresenta a relação percentual de perdas para cada material magnético. Similar ao conversor *Boost* convencional, as maiores perdas são provenientes do indutor e do interruptor. Por outro lado, o diodo do segundo estágio apresenta perdas percentuais elevadas aos demais componentes decorrentes do ponto de operação selecionado, tendo um ganho de tensão menor e, consequentemente, um tempo de condução maior.

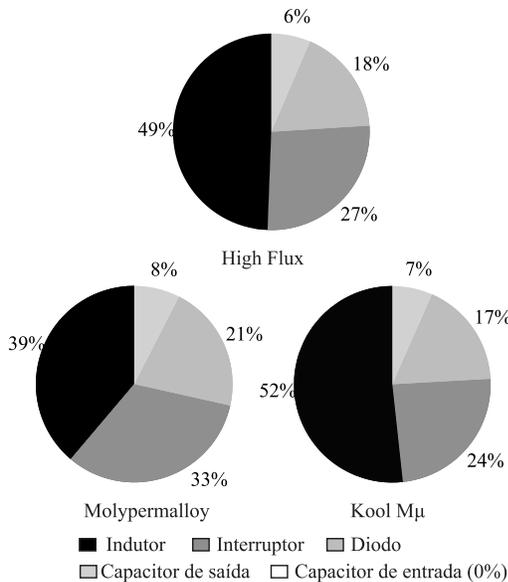


Figura 6: Perdas percentuais em cada elemento do conversor *Boost* Convencional.

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o uso de metodologias de otimização aplicadas aos conversores estáticos da família *Boost*. Na análise realizada, as figuras apontam diversas soluções ótimas em rendimento, volume e custo que podem ser utilizadas na aplicação, deixando a seleção do melhor projeto a cargo da metodologia ou do próprio projetista. Essas ferramentas agregam a análise e projeto dos conversores a seleção da melhor solução para aplicação, nas quais auxiliaram o projetista no desenvolvimento e na escolha de componentes e pontos de

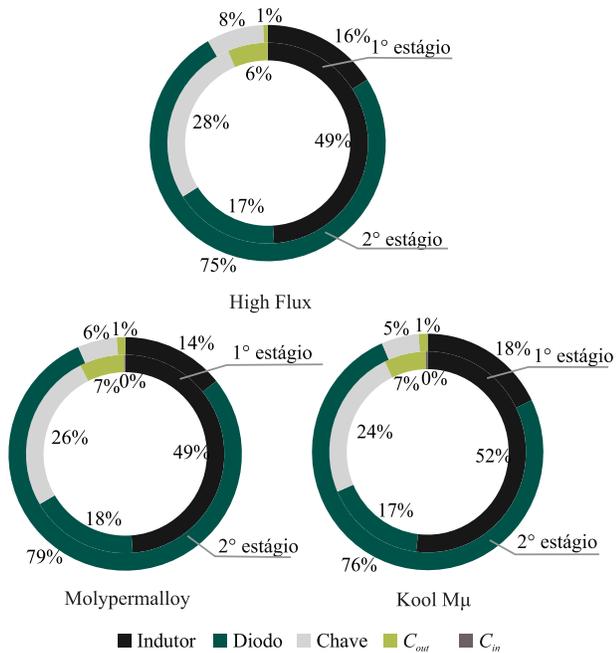


Figura 7: Perdas percentuais para o conversor *Boost Cascaded*.

operação em que cada conversor apresente maior rendimento, menor volume ou custo.

Para o conversor *Boost Cascaded*, as soluções selecionadas pela metodologia alcançaram elevados rendimentos e densidades volumétricas de potência. No entanto, com as análises de perdas e volumes realizadas nos componentes sob variação da tensão intermediária do conversor apontaram a utilização de único estágio, isto é, o uso do conversor *Boost* convencional.

Por fim, analisando comparativamente os dois conversores, as soluções visando maior rendimento, custo e menor volume apresentam maiores vantagens para o conversor *Boost* convencional em relação ao *Boost Cascaded*, devido ao maior número de componentes o que acaba limitando a obtenção de projetos ótimos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao PPGEE-PROEX/CAPES e ao projeto INCT-GD e aos órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES/PROEX processo no. 23038.000776/2017-54 - Código de Financiamento 001 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

REFERÊNCIAS

[1] A. Shahin, M. Hinaje, J. P. Martin, S. Pierfederici, S. Rael and B. Davat, "High Voltage Ratio DC-DC Converter for Fuel-Cell Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 12, pp. 3944-3955, Dec. 2010. doi: 10.1109/TIE.2010.2045996

[2] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, Sept.-Oct. 2005. doi: 10.1109/TIA.2005.853371

[3] Y. Tang, D. Fu, T. Wang and Z. Xu, "Hybrid Switched-Inductor Converters for High Step-Up Conversion," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 3, pp. 1480-1490, March 2015. doi: 10.1109/TIE.2014.2364797

[4] K. Tseng, J. Lin and C. Huang, "High Step-Up Converter With Three-Winding Coupled Inductor for Fuel Cell Energy Source Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 2, pp. 574-581, Feb. 2015. doi: 10.1109/TPEL.2014.2309793

[5] M. Prudente, L. L. Pfitscher, G. Emmendoerfer, E. F. Romaneli and R. Gules, "Voltage Multiplier Cells Applied to Non-Isolated DC-DC Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 2, pp. 871-887, March 2008. doi: 10.1109/TPEL.2007.915762

[6] T. Wu, Y. Lai, J. Hung and Y. Chen, "Boost Converter With Coupled Inductors and Buck-Boost Type of Active Clamp," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 1, pp. 154-162, Jan. 2008. doi: 10.1109/TIE.2007.903925

[7] L. Huber and M. M. Jovanovic, "A design approach for server power supplies for networking applications," APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.00CH37058), New Orleans, LA, USA, 2000, pp. 1163-1169 vol.2. doi: 10.1109/APEC.2000.822834

[8] S. Lee and H. Do, "High step-up cascade synchronous boost DC-DC converter with zero-voltage switching," in IET Power Electronics, vol. 11, no. 3, pp. 618-625, 20 3 2018. doi: 10.1049/iet-pel.2017.0432

[9] H. Chen, C. Lu and U. S. Rout, "Decoupled Master-Slave Current Balancing Control for Three-Phase Interleaved Boost Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 5, pp. 3683-3687, May 2018. doi: 10.1109/TPEL.2017.2760887

[10] M. Chen, F. Gao, R. Li and X. Li, "A Dual-Input Central Capacitor DC/DC Converter for Distributed Photovoltaic Architectures," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 1, pp. 305-318, Jan.-Feb. 2017. doi: 10.1109/TIA.2016.2606604

[11] M. D. Seeman and S. R. Sanders, "Analysis and Optimization of Switched-Capacitor DC-DC Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 2, pp. 841-851, March 2008. doi: 10.1109/TPEL.2007.915182

[12] R. Erickson and D. Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, 2nd ed. Norwell, MA: Kluwer, 2001.

[13] M. j. Tiburski, É. Bridi, H. C. Sartori and J. R. Pinheiro, "Analysis and Design of a High Step-Up Boost Converter Applied to Fuel Cell," 2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2018, pp. 817-824. doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627066

[14] H. C. Sartori, J. E. Baggio, H. L. Hey, J. R. Pinheiro and F. Beltrame, "Integrated methodology design to improve the efficiency and reduce volume of the CCM PFC boost converters with pre-sizing settings," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, 2015, pp. 1378-1385. doi: 10.1109/ISIE.2015.7281674

[15] H. C. Sartori, F. Beltrame, M. L. Martins, J. E. Baggio and J. R. Pinheiro, "Evaluation of an optimal design for a single-phase boost PFC converter (CCM) considering different magnetic materials core," 2013 Brazilian Power Electronics Conference, Gramado, 2013, pp. 1304-1310. doi: 10.1109/COBEP.2013.6785284

[16] M. j. Tiburski, "Técnicas para otimização de conversores da família boost com alto ganho de tensão e alto rendimento aplicados à célula a combustível". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brazil, 2019, pp. 1-210.

[17] M. j. Tiburski, H. C. Sartori and J. R. Pinheiro, "Ferramenta de Análise e Projeto de um Conversor Boost Cascaded Aplicado a Célula a Combustível," 2018 11th SEMINAR ON POWER ELECTRONICS AND CONTROL (SEPOC), Santa Maria, Brazil, 2018, pp. 1-6.

[18] M. j. Tiburski, H. C. Sartori and J. R. Pinheiro, "Comparativo entre tecnologias de materiais magnéticos aplicado ao conversor Boost Cascaded," 2018 11th SEMINAR ON POWER ELECTRONICS AND CONTROL (SEPOC), Santa Maria, Brazil, 2018, pp. 1-6.

[19] Fuel Cell Store, "3000W Fuel Cell Stack User Manual", Horizon Fuel Cell Technologies, August 2013.

[20] J. Laramie, Dicks A. John Wiley and Sons; "Fuel Cell Systems Explained". New York: 2003.