

FERRAMENTA DE ANÁLISE E PROJETO DE UM CONVERSOR BOOST CASCADED APLICADO A CÉLULA COMBUSTÍVEL

Mateus José Tiburski, Hamilton Confortin Sartori, José Renes Pinheiro
Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC)
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Santa Maria, Brasil
mateustiburski94@gmail.com, hamiltomsar@gmail.com, jrenes@gepoc.ufsm.br

Resumo—Este trabalho apresenta uma metodologia de projeto e análise de perdas/volume aplicado ao conversor *Boost Cascaded*. Este conversor é utilizado para elevação da tensão de uma célula combustível (3kW-50V) para um barramento CC (400V). Devido à baixa ondulação de corrente exigida pela célula combustível e a alta corrente fornecida por ela, torna a busca por projetos com elevadas eficiências e densidades volumétricas de potência uma difícil tarefa, pois resulta em volumosos indutores e com elevadas perdas nos elementos do conversor. Em vista disso, é proposto um algoritmo de otimização que analisa diferentes parâmetros de operação do conversor. Os resultados expõem as regiões de operação com menores volumes e perdas. Análises comparativas de diferentes tecnologias de materiais semicondutores e magnéticos apontam as melhores soluções para a aplicação em análise. Ao fim, é exibido um projeto com alto rendimento e reduzido volume, considerando as tecnologias com melhor desempenho para a aplicação.

Palavras-chave—Conversor *Boost Cascaded*, Perdas, Volume e Rendimento.

I. INTRODUÇÃO

As células combustíveis são fontes de energia renovável que garantem alta densidade de potência e baixa emissão de gases tóxicos. Tem como principal característica converter energia química em eletricidade [1] - [4]. No entanto, a energia produzida pela célula combustível possui níveis de tensão abaixo da aplicação, sendo necessário a utilização de equipamentos (conversores CC-CC) que façam a elevação de tensão entre a célula combustível e um barramento CC (400V) [5].

Atualmente, existem uma grande quantidade de conversores que podem ser utilizados nesta aplicação, como por exemplo: *Boost* intercalado [6], *Push-Pull* [7], combinação de um *Flyback* e *Forward* [8], *Buck-Boost* intercalado com indutor acoplado [9], conversor *Full-Bridge* intercalado [10], entre outros. Além da elevação de tensão, estes conversores devem limitar a ondulação de corrente da célula combustível (evitando degradação), ter alta taxa de eficiência e boa resposta dinâmica a alterações na carga ou na tensão de entrada [11] - [13].

Para a análise deste artigo, opta-se pelo conversor *Boost* em cascata ou também conhecido como *Boost Cascaded*, conforme Fig. 1. Este conversor é formado por dois conversores *Boost* convencionais (1º e 2º Estágio) o que garantem um alto ganho de tensão necessário para aplicação (ganho 8).

Esta topologia, não isolada, torna-se atrativa pensando em eficiência e densidade volumétrica de potência, pois em sua maioria os conversores utilizados são isolados, isto é, o alto ganho de tensão é obtido através de um transformador. No entanto, esta alta margem de ganho trás consigo um outro problema, a baixa eficiência, pois as perdas relacionadas ao transformador são elevadas [8], [10], [14], [15] e [16].

Com o avanço tecnológico e com a descoberta de novos materiais semicondutores, o meio acadêmico e industrial vem buscando desenvolver conversores que possuam elevados níveis de eficiência. Isto fica claro em [7], [9], [17], [18] e [19] onde a proposta não é apenas a elevação da tensão da célula combustível, mas sim a aplicação de técnicas e escolhas de componentes que tragam a mínima perda, garantindo assim, elevado rendimento e alta densidade volumétrica de potência do conversor.

Visto a preocupação com a busca de projetos com alta eficiência é um desejo crescente dos pesquisadores e também do meio industrial é proposto neste artigo uma metodologia de projeto que visa aliar diferentes parâmetros do conversor a novas tecnologias de semicondutores e elementos passivos presentes no mercado. Com esta ferramenta esperá-se minimizar o tempo e a busca da melhor solução para aplicação, expondo as melhores regiões de operação do conversor.

II. METODOLOGIA DE ANÁLISE E PROJETO DO CONVERSOR BOOST CASCADED

A presente metodologia de projeto baseia-se em um algoritmo matemático, que estima as perdas e o volume presentes nos componentes do conversor *Boost Cascaded*. Este algoritmo varre em uma ampla faixa os pontos de operação do conversor, como: frequência de chaveamento (f_s), ondulação de corrente no indutor (ΔI_L), densidade de corrente no condutor (J) e tensão intermediária (V_{int}).

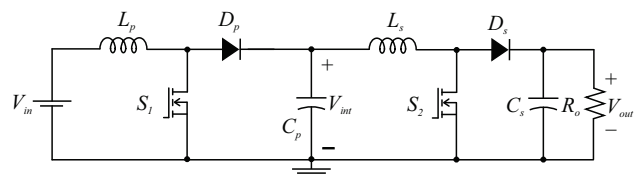


Figura 1. Topologia do conversor *Boost Cascaded*.

Estes quatro parâmetros estão diretamente ligados ao conversor, facilitando a análise do melhor ponto de operação que garante reduzidas perdas e menores volumes. O fluxograma do algoritmo proposto é apresentado na Fig. 2 e Fig. 3. Na Fig. 2 são definidas as especificações de entrada do conversor *Boost Cascaded*, como: a potência fornecida pela célula combustível (P_{in}), as faixas de operações dos pontos supra-citados ($f_s @ \Delta I_L @ J @ V_{int}$), temperatura ambiente (T_{amb}), temperatura de junção (T_j), número de chaves e capacitores em paralelo (N_{sw} , N_{cap} , respectivamente), variação da tensão no capacitor nos dois estágios (ΔV_{int} , ΔV_{out}) e a tensão de saída do conversor para o barramento CC (V_{out}). Por conseguinte, são definidos os diodos, chaves e dissipadores para cada estágio e o tipo de varredura a ser utilizada (rendimento ou volume).

Além disso, como a tensão intermediária é variável, cada estágio do conversor é projetado individualmente, conforme Fig. 2. A Fig. 3, apresenta o fluxograma de projeto dos dois estágios do conversor. Primeiramente, são obtidas as correntes de cada componente do conversor, após, é realizado o projeto do indutor e estimação de suas perdas. Com a escolha do diodo e da chave calculam-se as perdas e realiza-se o projeto dos seus respectivos dissipadores de calor. Então, para garantir a ondulação de tensão especificada nos dois estágios, projeta-se o capacitor e estimam-se suas perdas e volume. Ao final, estes projetos são somados e então é escolhida a solução que apresente melhor resposta em perdas ou volume, definidos anteriormente.

III. ANÁLISE DE PERDAS DO CONVERSOR BOOST CASCADDED

A. Perdas no indutor

A energia dissipada no indutor é obtida através das perdas relacionadas ao enrolamento e ao núcleo. As perdas no

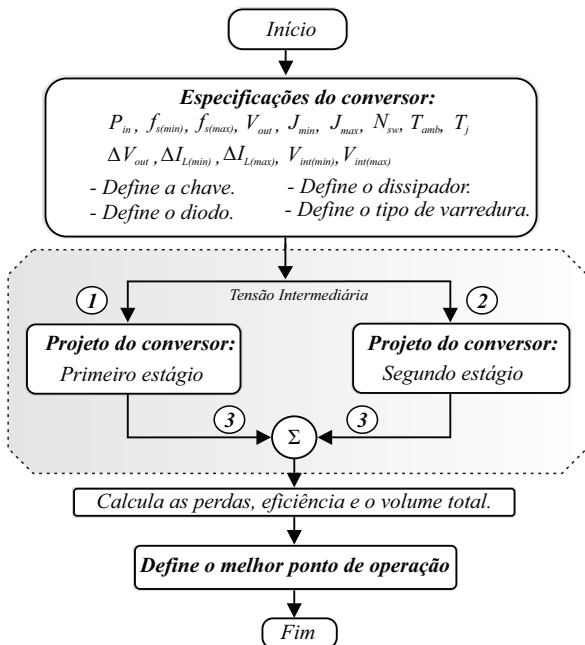


Figura 2. Fluxograma do algoritmo proposto.

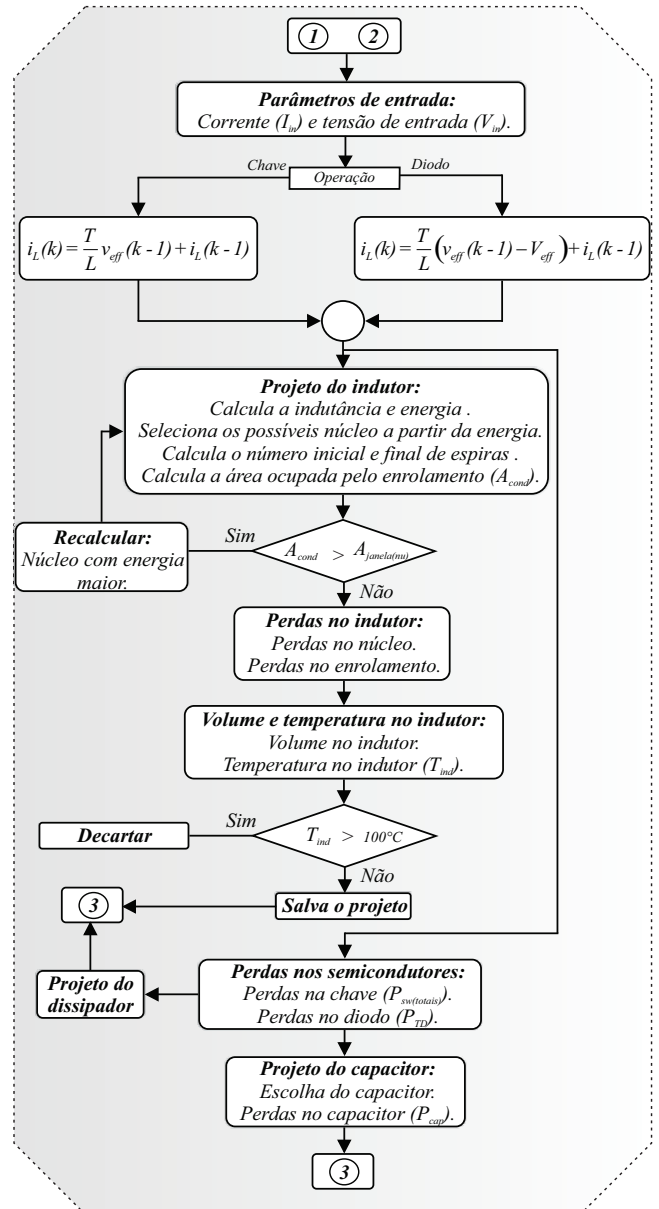


Figura 3. Fluxograma de estimação das perdas e volume.

condutor são adquiridas através das resistências CC e CA presentes no fio. A resistência CC do condutor é obtida por

$$R_{CC} = \frac{\rho l_w}{A_w} \quad (1)$$

onde, depende da resistividade elétrica do cobre (ρ), da seção transversal (A_w) e do comprimento do fio (l_w) [20]. Já a resistência CA é dada por

$$R_{CA}(f_h) = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} N_{ef} l_{esp} \sqrt{\frac{\rho \mu_{Cu} \pi f_h}{d_w t_w}} \left(1 + \frac{2(N_{cam}^2 - 1)}{3}\right) \quad (2)$$

sendo, N_{ef} o número de espiras, l_{esp} o comprimento médio da espira, μ_{Cu} a permeabilidade relativa do cobre, f_h a frequência do harmônico, d_w diâmetro do condutor, t_w a distância entre dois condutores adjacentes e N_{cam} o número

de camadas de enrolamento [20]. Com (1) e (2) calcula-se as perdas totais no fio, dada por

$$P_w = R_{CC} I_{L(rms)}^2 + \sum_{f_h=0}^{\infty} (R_{CA}(f_h) i_L^2(f_h)) \quad (3)$$

no qual, $I_{L(rms)}$ é a corrente eficaz em cada indutor e $i_L(f_h)$ a magnitude de corrente para cada harmônico considerado [20].

Por outro lado, as perdas no núcleo P_{nu} são obtidas por

$$P_{nu} = V_{nu} \cdot a \left(\frac{\Delta B_{nu}^b}{(2t_{on})^c} \frac{t_{on}}{T} + \frac{\Delta B_{nu}^b}{(2t_{off})^c} \frac{t_{off}}{T} \right) \quad (4)$$

e dependem diretamente do volume no núcleo V_{nu} , do tempo de condução da chave t_{on} , do tempo em que o diodo é polarizado diretamente t_{off} , do período T , da variação na densidade de fluxo magnético ΔB_{nu} e das características magnéticas do núcleo selecionado, obtidas no catálogo do fabricante (a, b, c) [20] [21] [22].

B. Perdas na chave

As perdas de condução no transistor estão associadas à resistência do canal no período de condução $R_{ds(on)}$. Esta resistência é diretamente ligada à temperatura de junção. As perdas de condução são obtidas por

$$P_{sw(Cond)} = I_{sw(RMS)}^2 \cdot R_{ds(on)} \quad (5)$$

onde, $I_{sw(RMS)}$ é a corrente eficaz que percorre a chave [23].

As perdas de comutação do transistor são calculadas no momento em que o interruptor é ativado por

$$P_{sw(on)} = \frac{1}{2} I_{min} V_{out} t_r f_s + \frac{1}{2} C_{oss} V_{out}^2 f_s \quad (6)$$

e durante o bloqueio por

$$P_{sw(off)} = \frac{1}{2} I_{max} V_{out} t_f f_s \quad (7)$$

sendo, I_{min} e I_{max} a corrente mínima e máxima do componente, respectivamente. Já, t_r o tempo de subida, t_f o tempo de descida, C_{oss} é a capacitância de saída do interruptor e f_s é a frequência de comutação do conversor [23].

A energia total dissipada pela na chave é obtida pelo somatório das perdas de condução e comutação, conforme (8).

$$P_{sw(totais)} = P_{sw(Cond)} + P_{sw(on)} + P_{sw(off)}. \quad (8)$$

C. Perdas no diodo

As perdas de condução no diodo são calculadas em função da queda de tensão, que ocorre quando o dispositivo semicondutor está em condução. Esta tensão (V_f), depende da corrente e da temperatura de junção em que o diodo esta operando. Por outro lado, as perdas de comutação são obtidas durante o bloqueio do diodo, estas são dadas em função da carga de recuperação reversa Q_{rr} (esta carga é relacionada à corrente e a temperatura de junção do semicondutor (T_j)), da tensão no diodo (V_{out}) e da frequência (f_s) [23]. As perdas totais no diodo são calculadas por

$$P_{TD} = V_f I_{d(med)} + Q_{rr} V_{out} f_s \quad (9)$$

sendo, i_d a corrente instantânea e $I_{d(med)}$ a corrente média que flui no diodo.

D. Perdas no capacitor

A perda de condução do capacitor está relacionada a resistência série equivalente R_{ESR} . Esta resistência é vinculada a temperatura e frequência da ondulação de corrente sobre o capacitor [23]. A equação que descreve o comportamento das perdas de condução no capacitor é dada por

$$P_{Cap} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_C^2(t) R_{ESR} dt \quad (10)$$

sendo, $i_C(t)$ a corrente instantânea no capacitor.

IV. RESULTADOS TEÓRICOS

Nesta seção serão apresentados os resultados da metodologia de projeto proposta, visando expor as regiões e os pontos de operação do conversor que garantem menores perdas e reduzidos volumes para a aplicação. Na Tab. I é apresentado os parâmetros iniciais de projeto do conversor *Boost Cascaded* contendo as faixas de variação dos pontos ($f_s @ \Delta I_L @ J @ V_{int}$). Além disso, para evitar degradação da célula combustível, a ondulação de corrente máxima de pico-a-pico foi definida até 10%.

As Fig. 4 - 5 apresentam um análise de perdas totais nos dois estágios do conversor *Boost Cascaded*, variando a frequência de chaveamento (f_s) e a ondulação de corrente (ΔI_L) para dois materiais magnéticos do tipo *Powder* (*High Flux* (HF) e *Molypermalloy* (MPP)). Os outros dois parâmetros de projeto ($J @ V_{int}$) foram deixados fixos, densidade de corrente ($J = 200 A/cm^2$) e tensão intermediária ($V_{int} = 200 V_{CC}$), para o melhor ponto de operação, visando menores perdas. A Fig. 4 apresenta as regiões onde o conversor opera com menores perdas para o núcleo *High Flux*, no primeiro estágio, onde a corrente é elevada, os melhores pontos de operação estão numa estreita faixa de frequência entre 45 e 60 kHz. Enquanto que, a ondulação de corrente tem seus melhores resultados acima de 8,5%. Já para o segundo estágio, devido a baixa corrente, as perdas são menores. A frequência de operação chega até 100 kHz e ondulações de corrente acima de 2,5%, variando conforme a frequência de operação.

A Fig. 5 apresenta o comportamento das perdas totais do conversor para o núcleo *Molypermalloy*, a região de menores perdas para este material estão em frequências entre 55 e 65

Tabela I
PARÂMETROS DE PROJETO DO CONVERSOR BOOST CASCADED

Parâmetros	Valor	Unidade
Frequência de chaveamento (f_s)	10 - 100k	Hz
Ondulação de corrente no indutor (ΔI_L)	1 - 66	%
Densidade de corrente no fio (J)	200 - 500	A/cm ²
Tensão intermediária (V_{int})	100 - 360	V
Potência de entrada (P_{in})	3000	W
Tensão de entrada (V_{in})	50	V
Tensão de saída (V_{out})	400	V
Temperatura ambiente (T_a)	25	°C
Temperatura junção (T_j)	100	°C
Fator de ocupação da janela (K_u)	40	%
Número de chaves em paralelo (N_{chav})	3 - 1	-
Número de capacitores em paralelo (N_{cap})	5 - 2	-
Diodo (1º estágio)	VS-60EPU06PbF	
Diodo (2º estágio)	IDW20G65C5	

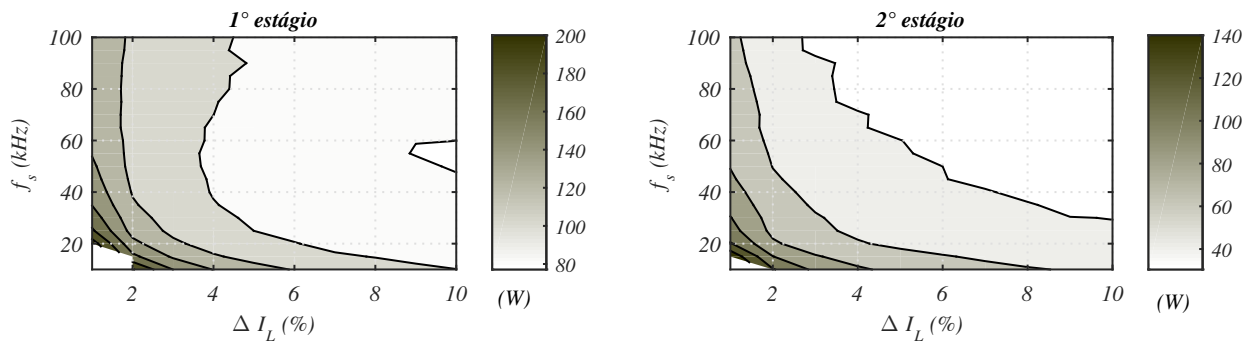


Figura 4. Perdas totais do conversor para o núcleo *High Flux*.

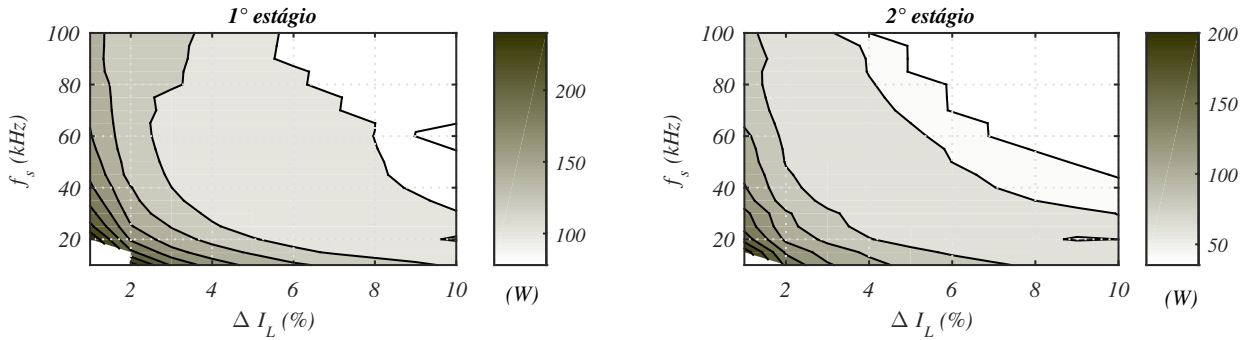


Figura 5. Perdas totais do conversor para o núcleo *Molypermalloy*.

kHz. No entanto, este núcleo apresenta perdas superiores a projetos com o núcleo *High Flux*, pois este material suporta uma menor densidade de fluxo ($HF = 1,5T$, $MPP = 0,75T$). O que causa maiores perdas no cobre, devido ao maior volume magnético e consequentemente, um maior comprimento médio da espiras [22], [24]. Já para o segundo estágio, as regiões de menores perdas para este núcleo chegam a 100 kHz com ondulações de corrente acima de 4%, variando conforme f_s .

Este limite de frequência imposto pelas perdas no 1º estágio de até 70 kHz, conforme Fig. 4 e Fig. 5 é consequência do aumento das perdas de chaveamento tanto da chave quanto do diodo. Esta conclusão pode ser vista na Fig. 6, o qual mostra o impacto das perdas dos elementos (indutor, chave, diodo e capacitor) do primeiro estágio a variação da

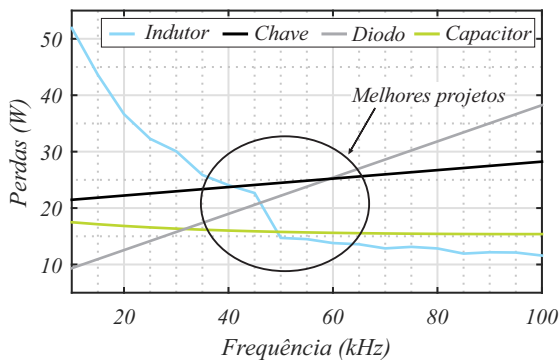


Figura 6. Perdas de cada componente do conversor para o 1º estágio, variando a frequência de chaveamento.

frequência, mantendo os demais parâmetros fixos no melhor ponto de operação ($\Delta I_L @ J @ V_{int}$).

As Fig. 7 e Fig. 8 apresentam o comportamento do volume, variando a frequência de chaveamento e ondulação de corrente no indutor para os dois núcleos magnéticos estudados. Devido ao baixo ΔI_L necessário para a célula combustível, há uma predominância maior do volume indutor em baixas e médias frequências. Já em alta frequência e ondulações de corrente acima 5% o maior impacto sobre o volume é determinado pelos dissipadores de calor dos semicondutores do conversor. Conforme Fig. 6, as perdas na chave e no diodo elevam-se com a frequência, exigindo um maior volume do dissipador de calor. Além disso, analisando comparativamente as figuras que expõem as regiões de perdas com as figuras que apresentam o volume total do conversor, observa-se que os melhores pontos de operação que garantem menores perdas estão sobre as regiões de baixo volume. O que torna, fácil a escolha do projetista por um projeto com alta densidade volumétrica de potência.

O impacto da variação na tensão intermediária do conversor é apresentado na Fig. 9, no qual expõem o comportamento das perdas totais do conversor para diferentes chaves com tecnologia de super-junção (CoolMOS C7, Infineon (600V - 69A)), Carbeto de silício (SiC) (SCT3022AL, Rohm Semiconductor (650V-93A)) e de silício (IRF250P224, Infineon (250 V e menor $R_{ds(on)}$)). Conforme a figura, o aumento da tensão intermediária torna as perdas totais maiores, pois o tempo em que a chave esta ativa aumenta, ocasionando maiores perdas de condução na chave para o primeiro estágio. Além disso, conforme Fig. 9, a chave com melhor desempenho para aplicação é a de silício (IRF250P224), com uma tensão intermediária de 200V (limite definido até 200 V,

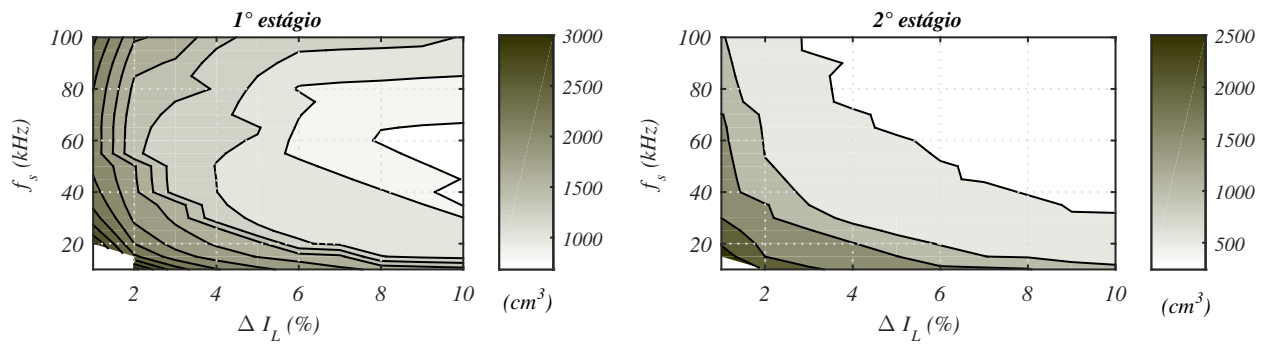


Figura 7. Volume total do conversor para o núcleo *High Flux*.

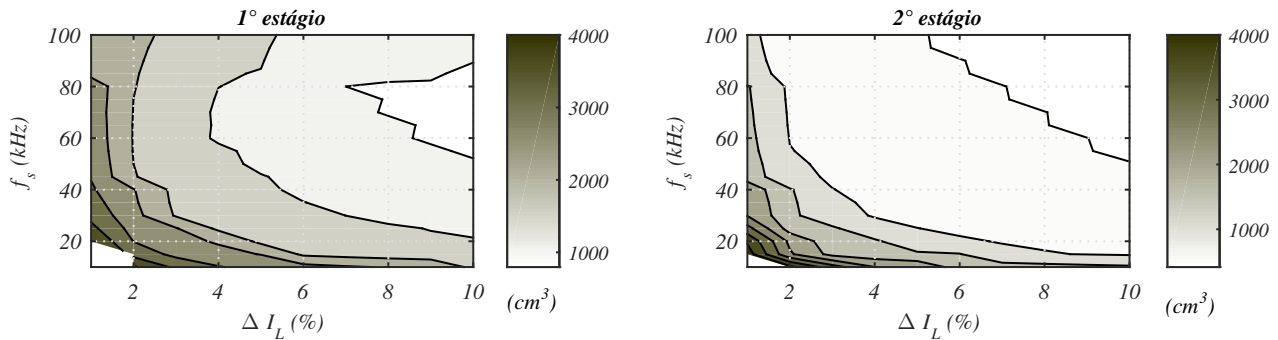


Figura 8. Volume total do conversor para o núcleo *Molypermalloy*.

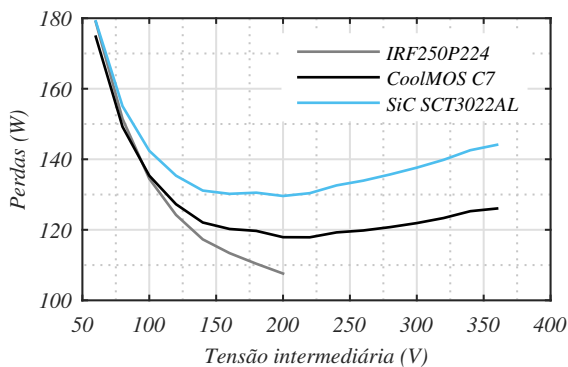


Figura 9. Perdas totais do conversor *Boost Cascaded* em função da tensão intermediária para três tecnologias de chaves diferentes.

abaixo da tensão suportada pela chave (250 V)). Enquanto que, para as demais tecnologias, com tensões de aplicação mais elevadas (600 V), notou-se uma elevação nas perdas com aumento na tensão, tendo os pontos com melhores resultados na faixa de 150 a 250 V.

As Fig. 4 - 9 apontam as regiões de operação e as melhores tecnologias de materiais magnéticos e de semicondutores para a aplicação. Com isso, percebe-se que o material magnético *High Flux* apresentou melhores resultados em relação a menores perdas e volumes. Já para chave, conforme Fig. 9, o melhor desempenho foi alcançado com a tecnologia de silício (IRF250P224). Com os componentes selecionados, é apresentado na Tab. II um projeto do conversor *Boost Cascaded* retirados pela metodologia proposta, com as perdas individuais de cada componente e o projeto do indutor de

entrada do primeiro e segundo estágio do conversor.

Com a metodologia proposta é alcançado um rendimento máximo 96,4% para uma potência de 3 kW, com um volume de 930,6 cm³, resultando em uma densidade de potência de 3,22 w/cm³. Este rendimento e volume, torna-se limitado devido a própria aplicação exigir baixas ondulações de corrente. O que exige um elevado volume do indutor com perdas mais

Tabela II
PROJETO DO CONVERSOR BOOST CASCADED

Parâmetros	Valores	
Rendimento	96,4%	
Perdas totais	107,5W	
Volume total	930,6 cm ³	
Estágio	Primeiro	Segundo
Rendimento	97,4%	98,9%
Frequência de chaveamento	50 kHz	90 kHz
Ondulação de corrente no indutor	10%	10%
Densidade de corrente no fio	200 A/cm ²	200 A/cm ²
Tensão intermediária	200 V _{CC}	200 V _{CC}
Número de chaves	3	1
Número de capacitores	5	2
Perdas totais	77,14W	30,44W
Perdas na chave	24,47W	6,74W
Perdas no indutor	14,71W	8,66W
Perdas no diodo	22,18W	11,84W
Perdas no capacitor	15,77W	3,19W
Capacitor	47μF	47μF
Indutância	0,125mH	0,74074mH
Núcleo	2-58099	2-58867
Permeabilidade efetiva	60	60
AWG	21	22
Número de fios em paralelo	73	37
Número de espiras final	30	92
Área necessária	0,3 cm ²	0,075 cm ²
Execução	0,3636	0,3828

elevadas. A escolha da tecnologia do diodo para o primeiro estágio também influencia diretamente nas perdas, pois esta ligada a tensão intermediária, pois para V_{int} menores há uma maior passagem de corrente e consequentemente, maiores perdas.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia de projeto voltado a análise de um conversor *Boost Cascaded* aplicado a célula combustível. Esta ferramenta busca encontrar um projeto que contenha alto rendimento e reduzido volume, garantindo também, as restrições de aplicação da célula combustível. Para isso, os parâmetros do conversor foram varridos em uma ampla faixa, demonstrando as melhores regiões de operação do conversor para diferentes tecnologias de materiais magnéticos e de semicondutores. A partir disso, foi apresentado um projeto do conversor, no qual foi exposto as perdas individuais de cada componente, ficando evidenciado um alto rendimento e um baixo volume para uma aplicação extrema, onde exige, uma ondulação de corrente baixa e um grande esforço do conversor (alta potência e alto ganho). Com esta metodologia de projeto fica evidenciado a facilidade do projetista a escolha da melhor solução, podendo encontrar vários projetos que atendam os critérios requeridos para uma determinada aplicação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao INCT-GD e aos órgãos financiadores CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1) pelo apoio financeiro.

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] M. Yamaguchi, T. Saito, M. Izumitani, S. Sugita and Y. Tsutsumi, "Analysis of control characteristics using fuel cell plant simulator," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 37, no. 5, pp. 378-386, Oct 1990. doi: 10.1109/41.103433
- [3] K. Jin, X. Ruan, M. Yang and M. Xu, "A novel hybrid fuel cell power system," 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Jeju, 2006, pp. 1-7. doi: 10.1109/pesc.2006.1712072
- [4] F. Z. Belhaj, H. E. Fadil, A. Tahri, K. Gaouzi, A. Rachid and F. Giri, "Sliding mode control of a cascade boost converter for fuel cell energy generation system," 2017 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), Rabat, 2017, pp. 1-6. doi: 10.1109/EITech.2017.8255239
- [5] "A bidirectional DC-DC converter for fuel cell electric vehicle driving system," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 21, no. 4, pp. 950-958, July 2006. doi: 10.1109/TPEL.2006.876863
- [6] L. Zhang, D. Xu, G. Shen, M. Chen, A. Ioinovici and X. Wu, "A High Step-Up DC to DC Converter Under Alternating Phase Shift Control for Fuel Cell Power System," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 30, no. 3, pp. 1694-1703, March 2015.
- [7] Q. Wu, Q. Wang, J. Xu, H. Li and L. Xiao, "A High-Efficiency Step-Up Current-Fed Push-Pull Quasi-Resonant Converter With Fewer Components for Fuel Cell Application," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 8, pp. 6639-6648, Aug. 2017. doi: 10.1109/TIE.2016.2638800
- [8] M. Taheri, J. Milimonfared, B. Abbasi Arand and S. Salehi Dobakhshari, "High step-up dual full-bridge ZVS DC-DC converter with improved integrated magnetics and new resonant switched capacitor cell," in IET Power Electronics, vol. 10, no. 6, pp. 606-618, 5 19 2017. doi: 10.1049/iet-pel.2016.0520
- [9] V. Samavatian and A. Radan, "A High Efficiency Input/Output Magnetically Coupled Interleaved Buck-Boost Converter With Low Internal Oscillation for Fuel-Cell Applications: CCM Steady-State Analysis," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 9, pp. 5560-5568, Sept. 2015. doi: 10.1109/TIE.2015.2408560
- [10] X. Kong and A. M. Khambadkone, "Analysis and Implementation of a High Efficiency, Interleaved Current-Fed Full Bridge Converter for Fuel Cell System," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 543-550, March 2007. doi: 10.1109/TPEL.2006.889985
- [11] G. Wu, X. Ruan and Z. Ye, "Nonisolated High Step-Up DC-DC Converters Adopting Switched-Capacitor Cell," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 1, pp. 383-393, Jan. 2015. doi: 10.1109/TIE.2014.2327000
- [12] P. Xuwei and A. K. Rathore, "Novel Bidirectional Snubberless Naturally Commutated Soft-Switching Current-Fed Full-Bridge Isolated DC/DC Converter for Fuel Cell Vehicles," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 5, pp. 2307-2315, May 2014. doi: 10.1109/TIE.2013.2271599
- [13] S. Njoya Motapon, L. A. Dessaint and K. Al-Haddad, "A Comparative Study of Energy Management Schemes for a Fuel-Cell Hybrid Emergency Power System of More-Electric Aircraft," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no. 3, pp. 1320-1334, March 2014. doi: 10.1109/TIE.2013.2257152
- [14] C. L. Shen and P. C. Chiu, "Buck-boost-flyback integrated converter with single switch to achieve high voltage gain for PV or fuel-cell applications," in IET Power Electronics, vol. 9, no. 6, pp. 1228-1237, 5 18 2016. doi: 10.1049/iet-pel.2015.0482
- [15] Q. Wu, Q. Wang, J. Xu and L. Xiao, "Implementation of an Active-Clamped Current-Fed Push-Pull Converter Employing Parallel-Inductor to Extend ZVS Range for Fuel Cell Application," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 64, no. 10, pp. 7919-7929, Oct. 2017. doi: 10.1109/TIE.2017.2701785
- [16] B. Han, C. Bai, J. S. Lee and M. Kim, "Repetitive Controller of Capacitor-Less Current-Fed Dual-Half-Bridge Converter for Grid-Connected Fuel Cell System," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, no. 10, pp. 7841-7855, Oct. 2018. doi: 10.1109/TIE.2018.2804898
- [17] Y. Cho and J. S. Lai, "High-Efficiency Multiphase DC-DC Converter for Fuel-Cell-Powered Truck Auxiliary Power Unit," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no. 6, pp. 2421-2429, July 2013. doi: 10.1109/TVT.2012.2227522
- [18] S. V. Araujo, R. P. Torrico-Bascope and G. V. Torrico-Bascope, "Highly Efficient High Step-Up Converter for Fuel-Cell Power Processing Based on Three-State Commutation Cell," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 6, pp. 1987-1997, June 2010. doi: 10.1109/TIE.2009.2029521
- [19] M. Nyman and M. A. E. Andersen, "High-Efficiency Isolated Boost DC-DC Converter for High-Power Low-Voltage Fuel-Cell Applications," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 2, pp. 505-514, Feb. 2010. doi: 10.1109/TIE.2009.2036024
- [20] J. R. R. Zientarski, R. C. Beltrame, D. B. Candido, M. I. D. S. Martins and H. L. Hey, "Design methodology for universal line input boost power factor correction magnetics," in IET Power Electronics, vol. 4, no. 6, pp. 715-724, July 2011. doi: 10.1049/iet-pel.2010.0039
- [21] 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
- [22] Magnetics. Powder cores, 2015. Available in: <https://www.maginc.com>. Accessed on: February 2018.
- [23] F. Beltrame, F. H. Dupont, H. C. Sartori and J. R. Pinheiro, "Design methodology to improve the converters' efficiency applied to photovoltaic systems," IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Dallas, TX, 2014, pp. 1397-1403. doi: 10.1109/IECON.2014.7048684
- [24] 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