

METODOLOGIA DE PROJETO DE CONVERSORES BOOST PARA APLICAÇÕES DE ALTA EFICIÊNCIA E ELEVADO GANHO DE TENSÃO

Mateus José Tiburski, Éder Bridi, 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, ederbridi@gmail.com, hamiltomsar@gmail.com, jrenes@gepoc.ufsm.br

Resumo—Este trabalho utiliza uma metodologia de projeto que combina o uso de um conjunto de componentes a busca da melhor solução através da maior eficiência. Esta metodologia, já consolidada, é aplicada através de um algoritmo que faz a varredura de diferentes pontos de operação do conversor. A metodologia avalia um conversor Boost de alta potência e alto ganho que faz a interface entre uma célula combustível e um barramento CC. Em virtude do alto ganho de tensão, este conversor é incomum para este tipo de aplicação, devido a limitação do ganho estático causado pelas resistências séries presentes nos componentes. Com isso, técnicas de minimização das resistências séries são expostas, buscando elevar o ganho do conversor. A partir destas técnicas, um conversor *Boost* é projetado, minimizando perdas e aumentando a eficiência, permitindo o uso desta topologia em aplicações de alta potência e alto ganho de tensão.

Palavras-chave—Conversor *Boost*, Célula combustível, Rendimento.

I. INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental e a busca por fontes de energia que não degradam o meio ambiente vêm recebendo um destaque especial nas últimas décadas. Uma destas fontes de energia, a célula combustível, não emite poluentes e apresenta alta taxa de eficiência [1]. No entanto, a energia elétrica produzida por uma célula combustível possui baixa tensão. Por tanto, é necessário o uso de um conversor CC-CC que realize a interface entre a célula combustível e o barramento CC. Visando assim, aumentar a tensão a níveis adequados de conversão (350-450 V_{CC}) e, proteger a fonte contra variações de carga [2], [3].

Contudo, para o ideal aproveitamento da energia gerada pela célula é necessário que estes conversores apresentem uma alta taxa de eficiência. Dessa forma, faz-se necessário o uso de técnicas que analisem a eficiência dos componentes do conversor. Ou seja, buscar dispositivos semicondutores e elementos passivos que minimizem as perdas durante o processamento da energia.

Com o advento de novas tecnologias de materiais semicondutores como Carbetto de Silício (SiC), Nitreto de Gálio (GaN) e o CoolMOS criou-se a possibilidade do desenvolvimento de conversores com uma maior eficiência e densidade de potência. Estes materiais trazem consigo

promissores avanços, pois apresentam baixas resistências de condução e baixas capacitâncias parasitas, possibilitando o aumento da frequência de chaveamento dos conversores. O que proporciona a redução do volume dos elementos magnéticos [4]. Contudo, a busca por um projeto ótimo ainda traz grandes desafios aos pesquisadores de hoje. Isto porque, aliar o dimensionamento dos elementos ativos aos elementos passivos de um conversor pode se tornar uma difícil tarefa, se realizada de maneira inadequada. Partindo deste pressuposto, este artigo visa buscar a aplicação de uma metodologia de projeto que aperfeiçoe a busca pela eficiência e minimize o tempo através do algoritmo apresentado em [5] e [6].

Este algoritmo será utilizado na otimização de um conversor *Boost* convencional aplicado para a elevação da tensão de saída de uma célula combustível, conforme Fig. 1. Esta topologia de conversor é utilizada pela simplicidade e o número baixo de componentes, o que torna este conversor interessante para a busca de uma melhor eficiência e densidade de potência. Devido ao alto ganho de tensão deste conversor, de 50 V_{CC} , no pior caso da célula combustível, para 400 V_{CC} , tensão do barramento CC, o maior esforço estará sobre a chave, pois 87,5% do tempo ela estará conduzindo, conforme (1), que descreve a equação do ganho estático ideal (M). Com base nesta afirmação, buscou-se também analisar o paralelismo de chaves e também de capacitores (devido a alta corrente eficaz presente no capacitor e elevada resistência série), visando assim diminuir a corrente que passa por estes componentes e consequentemente, a diminuição das perdas em condução.

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

Muitos trabalhos apresentam topologias de conversores para a elevação da tensão da célula combustível. Em [7], fez-se o uso da topologia do *Boost Interleaved* com duas fases, com multiplicador de tensão e estratégia de controle que visa minimizar os esforços das chaves. Esta topologia para uma potência nominal de 1 kW, alcançou um rendimento de 97,2%. Já em [8], a topologia estudada foi um conversor quasi-ressonante *Push-Pull* alimentado em corrente, ao qual buscava aumentar a confiabilidade e a diminuição do custo.

Esta topologia apresentou rendimento máximo 96,12% para uma tensão de entrada de 50 V e potência de 510 W. Por fim, em [9], utiliza-se da topologia isolada baseado na combinação de um *Flyback* e *Forward* que têm o mérito minimizar o tamanho do núcleo dos indutores acoplados. Por fim, um protótipo de 500 W é montado, alcançando um rendimento maior que 94%.

Com base nos trabalhos apresentados anteriormente, nota-se que as principais formas de elevação da tensão da célula combustível baseiam-se em conversores isolados ou em técnicas de intercalamento (*interleaved*). Além disso, estes trabalhos ressaltam que a utilização de um conversor *Boost* convencional para aplicação em alto ganho não é a ideal, pois devido a elementos parasitas e as perdas associadas aos componentes do conversor, fazem com que o ganho estático seja limitado [7] - [12]. Como ilustra na Fig. 2, onde apresenta a influência da resistência série do indutor (R_L) no ganho estático do conversor em relação percentual à resistência de carga (R). Com base nisso, e tendo posse do algoritmo que busque uma a melhor solução, optou-se pela escolha do conversor *Boost* convencional ao qual buscará a minimização das perdas para a elevação do ganho estático do conversor.

Para modelagem do ganho estático não ideal (M_{ef}) em (2), cada componente é representada por uma resistência série, conforme Fig. 1. Sendo R a resistência da carga, R_{SW} , R_L e R_D a resistência série da chave, do indutor e diodo, respectivamente. A equação (3) relaciona o rendimento com o ganho estático do conversor, sendo D' o complemento da razão cíclica [10].

$$M_{ef} = \left(\frac{1}{D'} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{R_L + DR_{SW} + D'R_D}{D'^2 R}} \right) \quad (2)$$

$$\eta\% = D' M_{ef} \cdot 100 \quad (3)$$

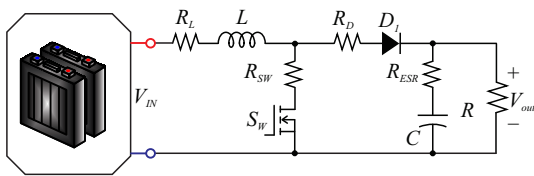


Figura 1. Conversor *Boost* aplicado a célula combustível.

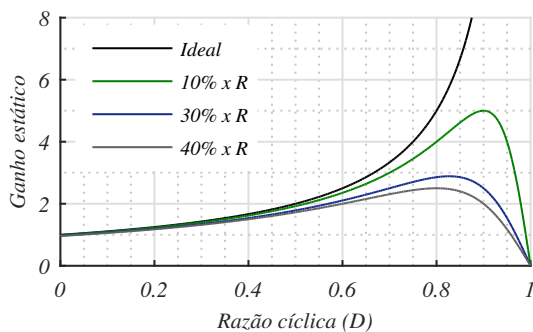


Figura 2. Influência da resistência série do indutor no ganho estático do conversor *Boost*.

II. METODOLOGIA DE PROJETO

A metodologia baseia-se na escolha do melhor projeto, podendo ser selecionado a melhor solução através do menor volume, maior rendimento ou densidade volumétrica de potência. O algoritmo desenvolvido fundamenta-se na varredura de três variáveis, a frequência de chaveamento, ondulação de corrente no indutor e densidade de corrente no fio. Estes três parâmetros variam de um ponto mínimo a um ponto máximo. Ao fim, este algoritmo escolhe o melhor projeto, selecionando o melhor ponto de operação a partir destes três parâmetros. As figuras 2, 3 e 4 apresentam de maneira sucinta o fluxograma do algoritmo. Primeiramente, são definidos os parâmetros de entrada e os componentes utilizados pelo conversor, após é realizado o projeto individual de cada componente e estimativa de suas perdas. Ao final, as perdas e o volume são somados, a eficiência do conversor é calculada e a melhor solução é escolhida.

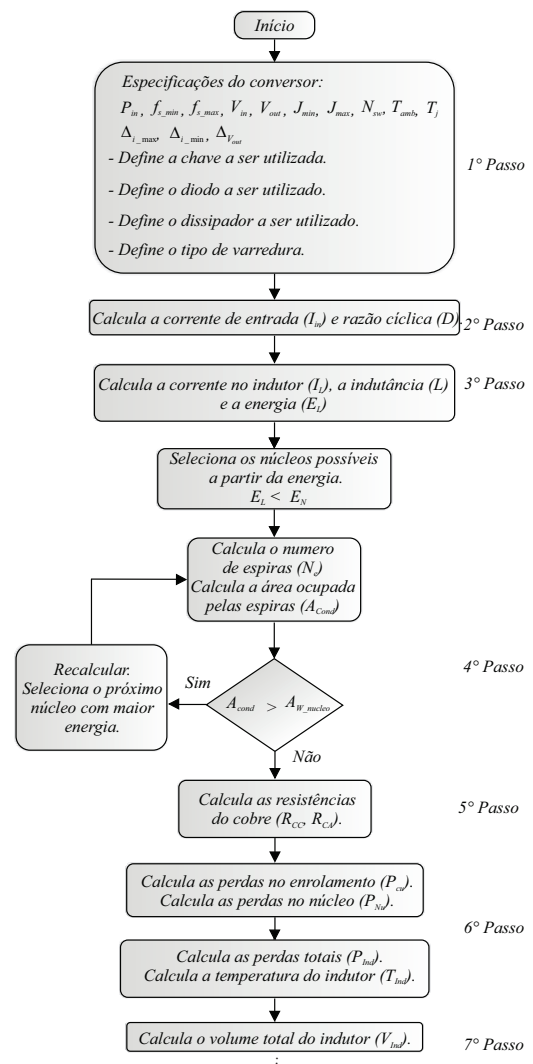


Figura 3. Fluxograma de entrada e projeto do indutor.

III. ANÁLISE DE PERDAS DE CADA COMPONENTE

A. Perdas no capacitor

A energia dissipada pelo capacitor de saída do conversor *Boost* está relacionada à perda ôhmica na resistência série

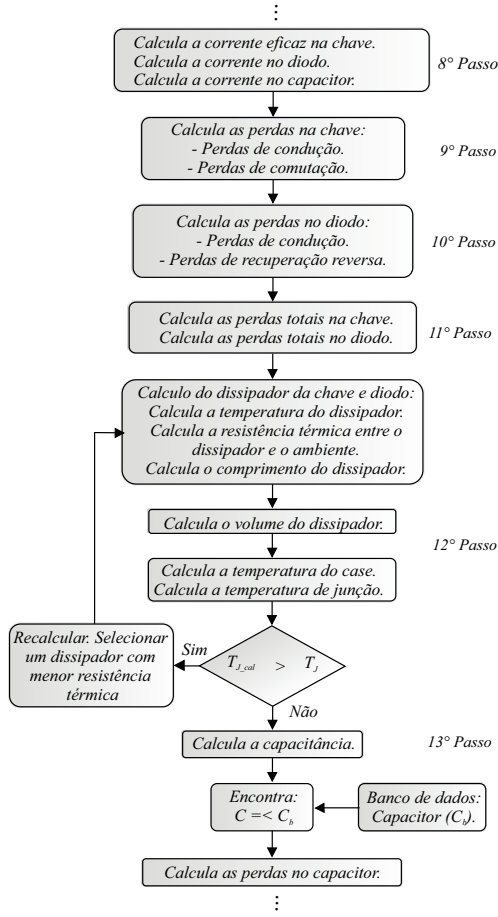


Figura 4. Fluxograma de estimação das perdas nos semicondutores.

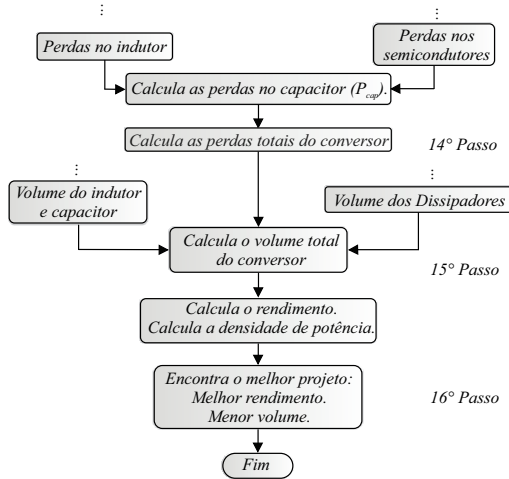


Figura 5. Fluxograma de escolha da melhor solução.

equivalente R_{ESR} . Esta resistência é vinculada a temperatura e a frequência da ondulação de corrente sobre o capacitor [13]. A equação que descreve o comportamento das perdas de condução no capacitor é dada por (4), sendo $i_C(t)$ a corrente instantânea sobre o capacitor.

$$P_{Cap}(t) = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_C^2(t) R_{ESR} dt \quad (4)$$

B. Perdas nos semicondutores

As perdas de condução no MOSFET estão associadas à resistência do canal no período de condução $R_{ds(on)}$. Esta resistência é diretamente ligada à temperatura de junção, sendo obtida do catálogo do fabricante [4]. As perdas de condução são obtidas por meio de (5), $i_{sw}(t)$ é a corrente instantânea que percorre o componente.

$$P_{sw(Cond)} = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} i_{sw}^2(t) R_{ds(on)}(T_J) dt \quad (5)$$

As perdas de comutação do MOSFET são calculadas para cada período de transição. No momento em que o interruptor é ativado a perdas são dadas por (6) e obtidas por (7) durante o bloqueio. Sendo, I_{min} e I_{max} a corrente mínima e máxima no semiconductor, respectivamente. V_{out} é a tensão de saída ou sobre a chave, t_r é o tempo de subida, t_f é o tempo de descida e C_{oss} é a capacitância de saída do interruptor [13].

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

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

As perdas totais na chave são obtidas pelo somatório das perdas de condução e comutação, conforme

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

As perdas de condução no diodo são calculadas em função da queda de tensão que ocorre quando o dispositivo semiconductor está em condução. Esta queda de tensão depende tanto da corrente quanto da temperatura de junção que o diodo opera. Por outro lado, as perdas de comutação são determinadas a partir da carga de recuperação reversa Q_{rr} do diodo durante o bloqueio, esta carga é diretamente relacionada à corrente e a temperatura de junção do semiconductor (T_J) [13]. A partir disso, as perdas totais no diodo são calculadas usando (9), onde $v_f(t)$ é a queda de tensão do semiconductor e $i_d(t)$ é a corrente instantânea que flui no diodo.

$$P_d = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_f(t) i_d(t) dt + Q_{rr} V_{out} f_s \quad (9)$$

C. Perdas no indutor

As perdas de enrolamento são obtidas em função da resistência CC e CA do condutor. A Resistência CC do condutor é obtida por

$$R_{CC} = \frac{\rho l_w}{A_w} \quad (10)$$

o qual depende da resistividade elétrica do fio ρ , da área da seção transversal A_w e do comprimento do enrolamento l_w [5].

Já a resistência CA é obtida para núcleos toroidais por

$$R_{CA}(f_h) = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{\frac{1}{4}} N_e l_t \sqrt{\frac{\rho \mu_C \pi f_h}{d_w t_w}} \left(1 + \frac{2(N_c^2 - 1)}{3}\right) \quad (11)$$

sendo, N_e o número de espiras, l_t o comprimento médio da espira, μ_C 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_c o número de camadas de enrolamento [5].

Dessa forma, as perdas no enrolamento são dadas pela soma das perdas CC e CA, conforme

$$P_w = R_{DC} I_{L(rms)}^2 + \sum_{f=0}^{\infty} (R_{AC}(f_h) i_L^2(f_h)) \quad (12)$$

Sendo $I_{L(rms)}$ a corrente eficaz no indutor e $i_L(f_h)$ a corrente de cada harmônico. Já as perdas relacionadas ao núcleo são dadas por

$$P_{nu} = V_{nu} \cdot a \left(\frac{\Delta B^b}{(2t_{on})^c} \frac{t_{on}}{T_s} + \frac{\Delta B^b}{(2t_{off})^c} \frac{t_{off}}{T_s} \right) \quad (13)$$

onde, dependem diretamente do volume do núcleo V_{nu} , do tempo de condução da chave t_{on} , do tempo de condução do diodo t_{off} , do período T_s , da variação da densidade de fluxo magnético ΔB e das características magnéticas de cada núcleo obtidas do catálogo (a, b, c) [5].

IV. RESULTADOS E SIMULAÇÕES

Na Tab. I são determinados os parâmetros de projeto utilizados para a varredura do algoritmo. A ondulação de corrente máxima de pico-a-pico foi mantida até 10%, para garantir baixa degradação da célula combustível. A chave utilizada é da família CoolMOS da fabricante Infineon (outras chaves poderiam ser analisadas, mas devido a característica de baixa resistência de condução, esta chave foi selecionada), o banco de capacitores eletrolíticos utilizados são da fabricante TDK Corporation™.

A resistência série total do indutor tem um papel fundamental no ganho estático do conversor *Boost*, pois está presente em ambos os estágios de operação do conversor, (2). Uma maneira de diminuir esta resistência é reduzir a densidade de corrente do fio, fazendo com que a seção transversal do condutor aumente, reduzindo a resistência do cobre, conforme (10). A Fig. 6 mostra a relação entre densidade de corrente do fio com as perdas totais e a resistência em série do

indutor. No entanto, uma menor densidade de corrente do fio pode causar projetos inviáveis, isto é, influenciar no tamanho do núcleo magnético, o que pode tornar o indutor volumoso, pois o algoritmo entra em um laço, buscando encontrar um núcleo exequível, conforme 4º passo, Fig. 3. Pensando nisso, um limite de $J_{min} = 300 A/cm^2$ foi determinado.

De acordo com (2), a chave também apresenta maior influência no ganho estático para razões cíclicas elevadas, pois sua resistência total é proporcional ao ciclo de trabalho (D). Além da busca por chaves com menor $R_{ds(on)}$, uma maneira de diminuir esta resistência é aplicar a técnica de paralelismo de chaves. Esta técnica mostra-se vantajosa nesta aplicação, pois reduz proporcionalmente a corrente que passa neste elemento, diminuindo as perdas de condução, conforme Fig. 7, que relaciona o número de dispositivos em paralelo com a resistência total série e as perdas no interruptor. A resistência série equivalente e as perdas totais relacionadas ao número de capacitores em paralelo são mostradas na Fig. 8 (os capacitores em adicionados em paralelo possuem mesma capacitância e resistência série). Esta resistência tem menor influência no ganho estático do conversor *Boost*, mas não deve ser negligenciada, pois afetam diretamente a eficiência do conversor.

Outros dispositivos semicondutores poderiam ser utilizados na análise, com melhor desempenho, no entanto, devido a alta corrente presente neste componente faz com que as perdas sejam altas mesmo com uma chave de menor resistência série,

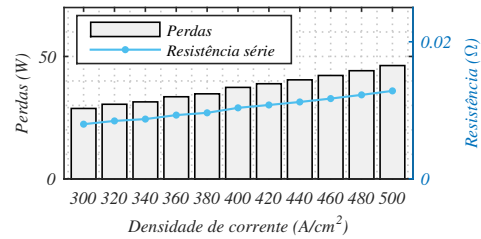


Figura 6. Variação da densidade de corrente em relação às perdas e a resistência série no indutor.

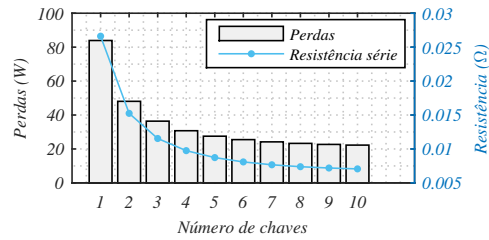


Figura 7. Número de chaves em relação às perdas e a resistência série.

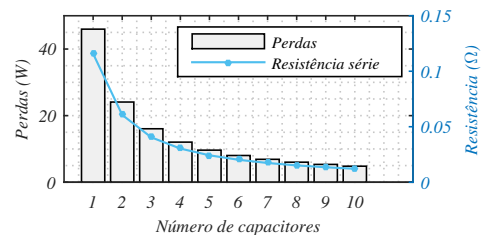


Figura 8. Número de capacitores em relação às perdas e a resistência série.

Tabela I
PARÂMETROS DE PROJETO DO CONVERSOR BOOST

Parâmetros	Valor	Unidade
Frequência de chaveamento	1 - 100	kHz
Ondulação da corrente no indutor	1 - 10	%
Densidade de corrente no fio	300 - 500	A/cm ²
Número de chaves	1 - 10	-
Número de capacitor	1 - 10	-
Percentual de uso da janela	0.4	-
Potência de entrada	3000	W
Tensão de entrada	50	V
Tensão de saída	400	V
Ondulação da tensão de saída	10	%
Temperatura ambiente	25	°C
Temperatura de junção	100	°C
Chave	IPW60R017C7	-
Diodo	IDW40G65C5	-
Núcleos	High Flux	-
Capacitores	TDK (47 - 1500)	µF

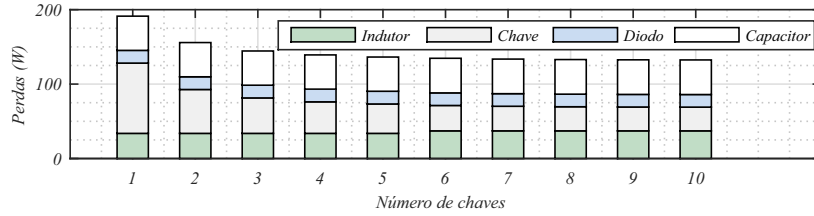


Figura 9. Perdas nos componentes do conversor *Boost* para cada chave em paralelo.

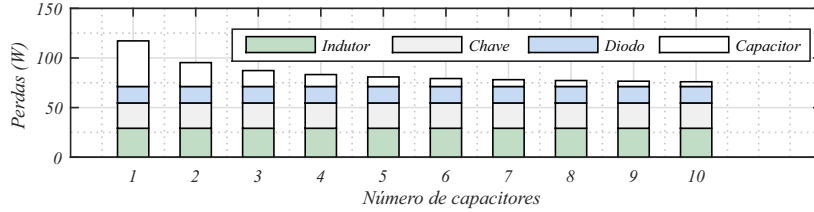


Figura 10. Perdas nos componentes do conversor *Boost* para cada capacitor em paralelo.

havendo a necessidade da utilização de chaves em paralelo. A Fig. 9 apresenta uma análise detalhada das perdas de cada componente do conversor, considerando o uso de até 10 chaves em paralelo com mesmo $R_{ds(on)}$. Observa-se que, para uma chave, as perdas relacionadas ao transistor representam cerca de 47,18% do total de perdas, utilizando material magnético *High Flux*. A adição de chaves em paralelo faz com que as perdas relacionadas no interruptor diminuam exponencialmente. Para os outros componentes, a contribuição para as perdas do conversor permanece constante, uma vez que o ponto de operação escolhido pelo algoritmo é o mesmo para todas as combinações de chaves.

Como visto na Fig.9, as perdas associadas ao capacitor apresentam uma grande contribuição nas perdas totais do conversor. Em vista disso, utiliza-se capacitores em paralelo para reduzir a corrente que flui através desses elementos. A Fig. 10 mostra uma análise de perdas do conversor considerando seis chaves em paralelo (este número máximo de interruptores é escolhido porque um aumento maior não apresenta uma diminuição significativa de perdas) e variando apenas o número de capacitores em paralelo. Como as perdas no capacitor são proporcionais à corrente quadrática (4), as perdas também diminuem exponencialmente com o acréscimo de capacitores paralelos.

No entanto, este número elevado de chaves e capacitores esbarra em outros problemas de otimização, o custo. A adição de chaves torna o sistema mais caro sem um aumento significativo no rendimento do conversor. Por outro lado, o aumento nas chaves traz consigo uma redução no volume do conversor, pois uma menor potência dissipada induz a um menor dissipador de calor para manter a mesma temperatura de junção. A técnica de paralelismo torna-se interessante para esta aplicação em específico, onde a corrente nestes componentes é alta. No entanto, projetos com menor potência onde a variedade de componentes é maior, com dispositivos de melhor desempenho, o paralelismo não torna-se a escolha ideal e sim a busca por componentes com melhor comportamento para a aplicação.

A Tab. II apresenta o resultado obtido pelo algoritmo para o projeto do conversor com seis chaves e quatro capacitores

em paralelo (com mesmo $R_{ds(on)}$ para chave e mesmo R_{ESR} para o capacitor). Além disso, são expostas o projeto do indutor, as perdas e as resistências séries de cada componente.

A Fig. 11 apresenta o ganho estático do conversor para aplicação das técnicas de paralelismo de transistores e capacitores e variação da densidade de corrente, utilizando-se das equações (1), (2) e (3) apresentadas anteriormente. Observa-se que o ganho alcançado para a condição de trabalho imposta é de 7,802, alcançando uma tensão de saída de 390,1V acima dos 350,0V descritos em [2]. O que confirma a utilização do conversor *Boost* e com a aplicação das técnicas de redução das resistências exposta é possível obter altos rendimentos e consequentemente altos ganhos de tensão para a aplicação abordada.

Tabela II
DADOS DE PROJETO OBTIDOS PELO ALGORITMO

Parâmetros	Valor	Unidade
Eficiência	97,2236	%
Frequência de chaveamento	26k	Hz
Ondulação de corrente	10	%
Densidade de corrente	300	A/cm ²
Material magnético	High Flux	-
Número de chaves	6	-
Número de capacitores	4	-
Indutância	291,67μ	H
Part Number	58337	-
Área da janela	47,1	cm ²
Energia	2500m	HA ²
Permeabilidade inicial	26	%
AWG	20	-
Número de fios em paralelo	33	-
Número de espiras	79	-
Área de seção	0,2	cm ²
Execução	0,3321	-
Capacitância	47μ	F
Perdas totais	83,2907	W
Perdas no indutor	29,1731	W
Perdas nas chave	25,5046	W
Perdas no diodo	16,5703	W
Perdas no capacitor	12,0427	W
Resistência no indutor	0,0081	Ω
Resistência na chave	0,0081	Ω
Resistência no diodo	0,0368	Ω
Resistência no capacitor	0,0305	Ω

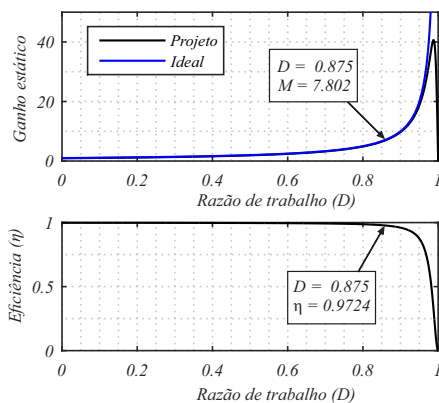


Figura 11. Ganho estático e eficiência do conversor para os resultados da Tab. II.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho utilizou uma metodologia de projeto voltada à busca de uma melhor solução para um conversor *Boost*, aplicado a elevação da tensão de uma célula combustível. Convencionalmente, devido às significativas perdas, esta topologia de conversor não é utilizada em aplicações com elevado ganho de tensão. Entretanto, a metodologia de projeto empregada aliada a técnicas de paralelismo e uma adequada escolha dos componentes possibilitaram o projeto de um conversor *Boost* com rendimento acima de 97% (97.22%). A aplicação desta técnica, baseada na varredura de três parâmetros de projeto, ondulação e densidade de corrente no indutor e frequência de chaveamento, resultaram em projetos de alta eficiência. Além disso, buscando elevar o ganho técnicas de redução das resistências foram apresentadas. Uma vez que, a aplicação da técnica de paralelismo de componentes resultou numa drástica diminuição nas perdas globais do projeto. Por exemplo, se compararmos o projeto proposto, Tab. II, com o projeto que considera apenas uma chave e um capacitor (Fig. 9), as perdas totais diminuíram em torno de 56% o que acarretaram num aumento na eficiência de 3,29%. Com base nos resultados obtidos são calculadas as resistências série de cada elemento do conversor e posteriormente, são apresentadas as curvas do ganho estático do conversor, evidenciando a possibilidade da utilização da topologia *Boost* em aplicações com alto ganho e alta potência. Por fim, vale ressaltar que o paralelismo de transistores e de capacitores pode reduzir as perdas e aumentar o ganho estático de conversores *Boost*.

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] N. Rasid, N. A. Rahim and S. R. S. Raihan, "Comparative study of DC-DC converters for fuel cell vehicle," 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016), Kuala Lumpur, 2016, pp. 1-4. doi: 10.1049/cp.2016.1309

[2] Jin Wang, F. Z. Peng, J. Anderson, A. Joseph and R. Buffenbarger, "Low cost fuel cell converter system for residential power generation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1315-1322, Sept. 2004. doi: 10.1109/TPEL.2004.833455

[3] 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

[4] H. C. Sartori, F. Beltrame, H. H. Figueira, J. E. Baggio and J. R. Pinheiro, "Power density comparative analysis concerning to three transistor technologies applied to a CCM PFC BOOST converter using optimization techniques," 2013 Brazilian Power Electronics Conference, Gramado, 2013, pp. 1317-1323. doi: 10.1109/COBEP.2013.6785286

[5] 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

[6] L. C. Pivetta, H. C. Sartori and J. R. Pinheiro, "Designing power converters based on trade-offs and constrains," IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, 2016, pp. 3709-3714. doi: 10.1109/IECON.2016.7794001

[7] 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. doi: 10.1109/TPEL.2014.2320290

[8] 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

[9] M. Taheri, J. Milimonfared, B. Abbasi Arand and S. Salehi Dobbakhshari, "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

[10] Erickson, R. W., 2000. Fundamentals of Power Electronics. Second Edition. Secaucus, NJ, USA: Kluwer Academic Publishers.

[11] Siwakoti, Y. P.; Blaabjerg, F. Single switch nonisolated ultra-step-up dc-dc converter with an integrated coupled inductor for high boost applications. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 32, n. 11, p. 8544-8558, Nov 2017. ISSN 0885-8993.

[12] Wang, J. et al. Low cost fuel cell converter system for residential power generation. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 19, n. 5, p. 1315-1322, Sept 2004. ISSN 0885-8993.

[13] 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

[14] Hart, D. W., 2012. "Power Electronics: analysis and design of electrical circuits". Daniel W. Hart. AMGH Publisher.

[15] Magnetics, 2015. Powder cores. Available in: <https://www.maginc.com>. Accessed on: February 2018.

[16] F. Beltrame, F. H. Dupont, H. C. Sartori, L. Roggia, E. C. Cancian and J. R. Pinheiro, "Different optimum designs investigation of DC/DC boost converter applied to the photovoltaic system," 2013 Brazilian Power Electronics Conference, Gramado, 2013, pp. 538-543. doi: 10.1109/COBEP.2013.6785167

[17] Arnold Magnetic Technologies Corporation. "Soft Magnetic Applications Guide," Rochester, NY. 2015 Rev A

[18] H. C. Sartori, J. E. Baggio and J. R. Pinheiro, "A comparative design of an optimized boost inductor taking into account three magnetic materials technologies: Volume, cost and efficiency analysis," 2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Fortaleza, 2012, pp. 1-6. doi: 10.1109/INDUSCON.2012.6452415

[19] 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

[20] 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