

Etapas para customização e otimização de um sistema com fonte renovável PV e *Boost* N-Celulas

Éder Bridi*; Mateus José Tiburski*; Hamilton Confortin Sartori*; e José Renes Pinheiro*
Grupo de Eletrônica de Potência e Controle-GEPOC

Centro de Tecnologia - CT
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
Santa Maria - RS, Brasil

E-mails: ederbridi@gmail.com, mateustiburski94@gmail.com, hamiltomsar@gmail.com, jrenes@gepoc.ufsm.br

Resumo— Este trabalho apresenta as etapas para otimização de projetos customizados para aplicação em fontes de energia renovável. A fim de exemplificar a metodologia faz-se um estudo de caso utilizando como fonte de alimentação um arranjo de painéis fotovoltaicos conectados em série. A potência e nível de tensão são dados pela variação da temperatura de operação e irradiação solar na cidade de Santa Maria-RS. Na otimização dos projetos dos conversores CC/CC *Boost* convencional e intercalado, é escolhido o ponto ótimo de operação ($\Delta_{iL} @ f_s @ J$), que serve como referência para a seleção dos materiais magnéticos, condutores, semicondutores e capacitores que compõem a topologia. Além disso, possibilita definir as variações da arquitetura cujo arranjo propiciará o melhor rendimento global do sistema e filtros com tamanho reduzido.

Palavras-chave – Customização, Intercalamento, Projeto, ondulação de tensão e corrente

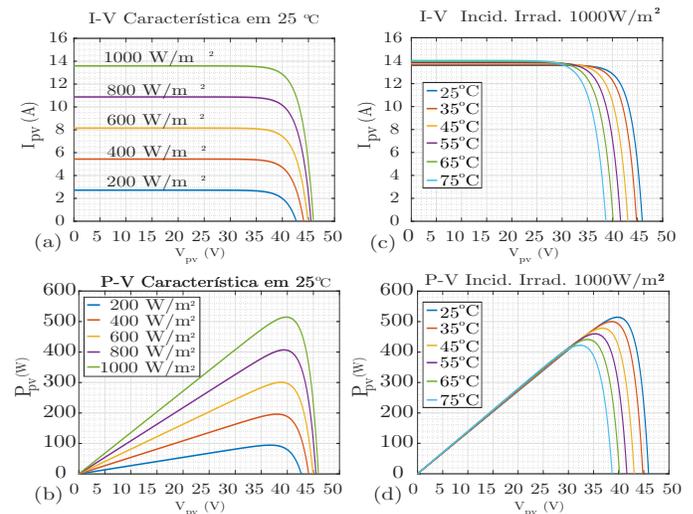
I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos nota-se um aumento expressivo na disponibilidade de energia elétrica proveniente de sistemas que utilizam fontes renováveis. Impactos ambientais indesejados, causados pela utilização de combustíveis não renováveis e alguns métodos convencionais de geração, têm contribuído bastante para este crescimento [1], [2]. Crescentes avanços no desenvolvimento de tecnologias, que constituem os conversores de energia e metodologias de projeto, possibilitam equipamentos com maior: densidade volumétrica de potência; confiabilidade; eficiência e menor preço [3], [4].

Com intuito de suprir a demanda energética oriunda de fontes de energia renovável, painéis fotovoltaicos (PV) têm sido amplamente empregados. A geração de energia destas fontes é ditada por parâmetros ambientais como irradiação solar e temperatura de operação do próprio painel fotovoltaico. Ou seja, para maiores índices de irradiação solar tem-se maior disponibilidade de energia e maior nível de tensão fornecida. Entretanto, com maiores temperaturas de operação tem-se a diminuição da quantidade de energia produzida e por conseguinte a redução da amplitude de tensão nos terminais de conexão do painel ou arranjo destes painéis.

Na Fig.1 são apresentadas as curvas características de um painel fotovoltaico. Nela constam valores pré especificados de irradiação e temperatura, comportamento da tensão e corrente disponibilizados. Na figura 1 (a & b) portam as curvas de variação de tensão vs corrente; tensão vs potência, respectivamente, para uma temperatura de 25°C em índices de irradiação solar que variam de 1000 W/m² até 200 W/m². Já na figura 1 (c & d) estão as curvas de variação de tensão vs corrente; tensão vs potência, respectivamente, para um índice de irradiação solar de 1000 W/m² e temperaturas que variam de 25 °C até 75 °C.

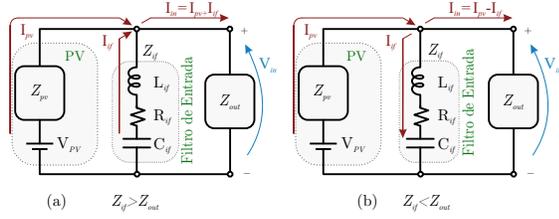
Figura 1: Curvas características de tensão e potência de um painel fotovoltaico.



Na maioria dos casos os níveis de tensão fornecidos por estes sistemas difere do exigido. Por isso, a conexão da fonte de geração à carga é intermediado por um conversor, ou sistema de processamento, que ajusta a amplitude da tensão à níveis determinados pelas especificações do barramento de conexão à carga[5]. Há um grande número de topologias propostas a fim de adequar a tensão fornecida por estas fontes. Todavia, é de fundamental importância que se utilize conversores de maior simplicidade antes de empregar os que possuem maior custo e/ou maior complexidade[6].

A solução que apresenta maior simplicidade, empregada em sistemas, para elevação da tensão, que não exijam ganhos muito elevados, é a dos conversores do tipo *Boost*[7]. A utilização de intercalamento de células, desta topologia, torna possível reduzir a amplitude da ondulação das grandezas, tensão e corrente, tanto na entrada quanto na saída do conversor. Permite, também, reduzir a magnitude da capacitância e/ou indutância, assim sendo, menor volume e custo do filtro. Além disso, uma menor amplitude de ondulação da corrente, na fonte, possibilita ao sistema de rastreamento, do ponto de máxima potência, operar na maior parte do tempo em sua posição de otimalidade. Condição que faculta maior eficiência e oferta de energia à fonte geradora [8].

Figura 2: Circuito: fonte-filtro, Carga e conversor.



A amplitude de ondulação da corrente de entrada do conversor *boost* intercalado depende de fatores como: impedância da fonte geradora; características do filtro de entrada; indutância(s) do conversor; resistências parasitas nos componentes; número de células em paralelo; técnica de intercalamento; razão cíclica; carga à qual a fonte está conectada.

Na Fig.2 pode-se observar a representação do circuito de um sistema de geração conectado a um filtro e a uma impedância. Onde a impedância da fonte fotovoltaica é representada por Z_{pv} , impedância do filtro de entrada Z_{if} é composta composta pela: indutância L_{if} , resistência série equivalente R_{if} e capacitância C_{if} . Já Z_{out} representa a composição das impedância do conversor e da carga. I_{pv} , I_{if} , I_{in} representam as correntes de saída do painel, do filtro e entrada do conversor respectivamente. V_{pv} e V_{in} são as amplitudes das tensões internas no painel e na entrada do conversor estático, respectivamente.

A capacidade de produção de energia, da fonte, está diretamente relacionada sua impedância Z_{pv} . Assim sendo, a amplitude da corrente depende da potência e nível de tensão, possível, em um determinado instante de tempo. O filtro de entrada é visto pela fonte geradora como: uma fonte auxiliar em paralelo com o painel, no momento em que Z_{out} for menor que Z_{if} fig 2(a); uma carga em paralelo com o conversor quando Z_{out} , for maior que Z_{if} Fig 2(b).

Portanto, é importante que a fonte consiga fornecer a corrente instantânea exigida pelo conversor. O projeto adequado do filtro, auxilia a fonte no fornecimento de corrente, mitigando a amplitude da ondulação. Em outras palavras o filtro absorve energia junto a carga no período em que a corrente decresce e fornece energia a carga no período de ascendência da corrente. Todavia, para elevadas ondulações são necessários filtros grandes, com volume e custo elevado[9].

Técnicas de modulação no intercalamento de células possibilita, entre outros benefícios, reduzir a amplitude da ondulação da corrente de entrada do conversor *boost* intercalado. Tendo como premissa um projeto adequado, tanto do filtro de entrada como o da fonte geradora, intercalamento com ângulo de $(\frac{\pi}{n})$ entre as (n) células, circuitos paralelos com as mesmas especificações de projeto e operação em modo de condução contínuo (CCM) [10], [11], [12].

A amplitude da ondulação de corrente de entrada para o conversor *boost* com (n) células em um ponto específico de Razão cíclica é dada por 1. Esta porta além dos parâmetros comumente utilizados na literatura: Tensão de entrada do conversor (V_{in}), indutância (L), período de comutação (T_s) e razão cíclica (D). Porta também as resistências série equivalentes do indutor (R_L), e do interruptor (R_{sw}). Pois estas inserem dinâmicas que alteram a amplitude da ondulação da corrente. O fator de multiplicação $(\frac{|sen(n\pi D)|}{n})$ mostra o comportamento desta ondulação para um ponto específico de Razão cíclica [8].

$$\Delta I_{in} = \frac{V_{in}}{R_L + R_{sw}} - \frac{V_{in} e^{-\frac{DT_s (R_L + R_{sw})}{L}}}{R_L + R_{sw}} \left(\frac{|sen(n\pi D)|}{n} \right) \quad (1)$$

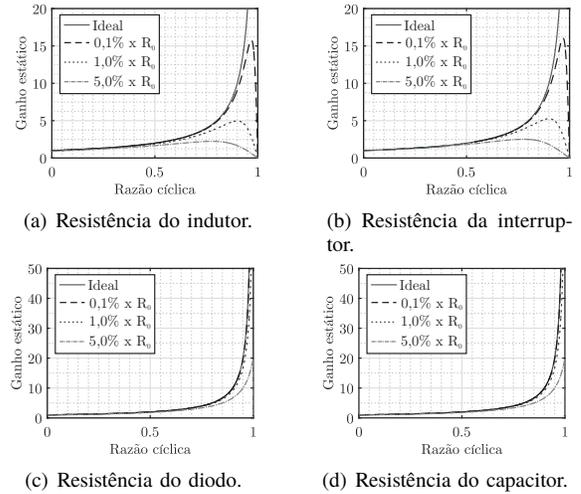
O cálculo da resistência série equivalente é dada por 2 onde R_{comp} representa a resistência série equivalente, P_{comp} é a potência dissipada e I_{comp_rms} é a corrente eficaz, individual associada a cada componente.

$$R_{comp} = \frac{P_{comp}}{I_{comp_rms}^2} \quad (2)$$

Mudanças do ponto da razão cíclica, necessárias devido a variações de tensão e de potência, fazem com que o conversor não opere em um ponto específico, mas dentro de uma faixa de razão cíclica. Diferentes pontos de operação, imprimem variações nas perdas ôhmicas e, por conseguinte, valores de resistência série equivalente que variam ao longo da faixa desta operação. Além disso, estas perdas reduzem a capacidade de ganho estático do conversor, obrigando o sistema de controle fazer incrementos à razão cíclica. Entre tanto, pode haver situações que mesmo com estes incrementos o conversor o ganho especificado [8].

Na Fig. 3, (R_o) representa a resistência de carga e as resistências equivalentes de cada componente são um percentual desta. As resistências série equivalentes de cada componente impacta distintamente o ganho estático do conversor *boost*.

Figura 3: Influência das resistências séries equivalentes no ganho estático do conversor *boost* em CCM.



A somatória da influência destas resistências afeta diretamente a relação entre Ganho e Razão cíclica. Assim sendo, é imprescindível a utilização de uma metodologia que consiga reduzir de forma global a influência destas resistências possibilitando, ganhos estáticos mais elevados mesmo com o emprego das mesmas tecnologias [8], [13].

A fim de mitigar a influência das resistências parasitas, desenvolve-se projetos otimizados que busquem em bancos de dados de componentes, tecnologias, que contenham o arranjo que apresentem a melhor performance global de eficiência, volume e custo para um ponto de operação que leva em consideração período de comutação (T_s), amplitude de ondulação (ΔI_{in}) e densidade de corrente (J).

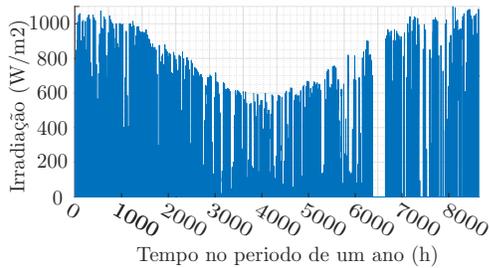
A proposta deste trabalho é apresentar uma metodologia de projeto otimizado que busca em de bancos de dados,

tecnologias de componentes cujo arranjo, ponto de operação ($T_s @ \Delta I_{in} @ J$) e número de células do tipo *boost* intercaladas detenha maior eficiência com possibilidade de redução de filtros de entrada e saída do conversor. Para tal, são avaliados as condições ambientais, locais, determinantes para obtenção do comportamento da potência e nível de tensão disponibilizados pela fonte geradora ao longo do período de um ano. Assim, determinando qual a melhor topologia para a aplicação. Para explanar a metodologia, será utilizado um como fonte de geradora um arranjo com quatro painéis fotovoltaicos em série. A energia gerada será entregue a um barramento em corrente contínua (CC) de 400 volts. A adequação será feita por um conversor elevador, cujo método irá indicar qual o número adequado de células para a aplicação.

II. DINÂMICA DA FONTE GERADORA

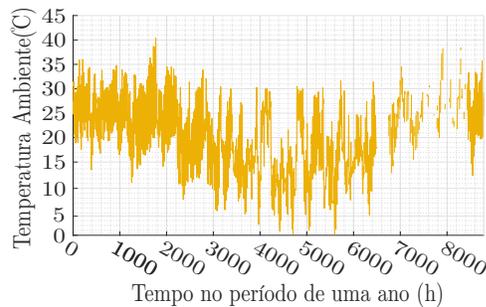
Para se desenvolver o projeto adequado de um conversor, é necessário que se conheça a dinâmica da fonte de alimentação. A fim de exemplificar a metodologia, este trabalho utiliza a fonte de entrada um arranjo de quatro painéis fotovoltaicos em série do modelo 480W- 500W Longi LR5-66HPH [14]. A dinâmica da fonte está condicionada a parâmetros como irradiação solar e temperatura. A Fig. 4 porta o índice de irradiação solar. Todos os dados para construção das figuras desta seção, são das médias por hora do ano de 2020 para cidade de Santa Maria-RS. Base, dados históricos de [15].

Figura 4: Irradiação solar



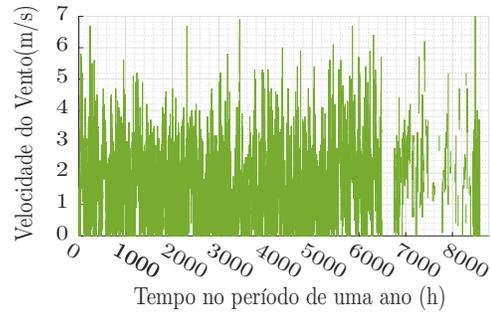
A temperatura no painel fotovoltaico varia em função da irradiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento. Nas Fig. 5 e 6, estão presentes, respectivamente os dados de temperatura ambiente e velocidade de vento.

Figura 5: Temperatura ambiente



Com os dados de Irradiância solar, Temperatura ambiente e velocidade do vento, disponibilizados em [15] e fazendo uso da equação: 3, sugerida por [16]. Estes são utilizados para

Figura 6: Velocidade do vento



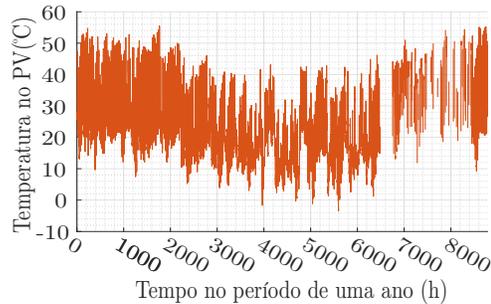
predição da temperatura de operação do painel fotovoltaico, comportamento apresentado na Fig. 7.

Tabela I: Dados utilizados na equação: 3

Simbolo	Nomenclatura	Unidade
T_a	Temperatura Ambiente	$^{\circ}C$
G_T	Irradiância Solar	W/m^2
V_w	Velocidade do Vento	m/s

$$T_{pv} = 2.0458 + 0.9458T_a + 0.0215G_T - 1.2376V_w \quad (3)$$

Figura 7: Temperatura de operação T_{pv} , do painel fotovoltaico



Em [17] é apresentada a modelagem matemática de painéis fotovoltaicos, utilizando irradiação solar, Temperatura de operação e dados disponibilizados pelos fabricantes. Desta forma, pode-se calcular a tensão e potência disponibilizada pelo painel em todo período de tempo e função das condições ambientais de operação. Tendo em vista que os níveis de tensão e potencia apresentados nas Fig. 8 e 9, se encontram no ponto de máxima potência, para tensão e potência respectivamente. Estas, oriundas do arranjo de quatro painéis dispostos em série.

III. PROJETO OTIMIZADO DO CONVERSOR E ESCOLHA DO NÚMERO ADEQUADO DE CÉLULAS

Conhecendo as dinâmicas: tensão disponibilizada na saída da fonte e do barramento ao qual será conectada a carga; variação da potência que será processada, passa-se para a segunda etapa de projeto do conversor. Nesta etapa, faz-se a seleção dos componentes que farão parte do banco de dados. A primeira seleção se dá analisando as características como suportabilidade de tensão e corrente, Nas junções dos semicondutores, nos dielétricos dos capacitores e isolamento de área da seção do condutor. É feita então a modelagem matemática das formas de onda de tensão e corrente em cada

Figura 8: Tensão gerada pelo arranjo (PV)

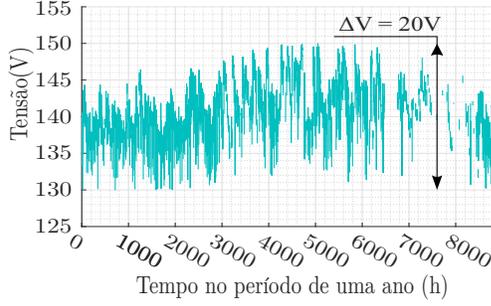
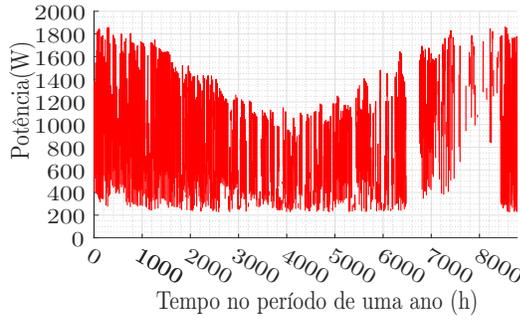


Figura 9: Potência gerada pelo arranjo (PV)



componente.

As equações 4 e 5 modelam a forma de onda da corrente, no indutor, em cada célula do conversor *boost* para o interruptor desligado $i_L(t_{off})$ e ligado $i_L(t_{on})$ respectivamente. A somatória das correntes circulantes em cada célula em seus respectivos tempos de comutação, representa a corrente na entrada do conversor I_{in} conforme equação 6. Onde: V_{in} representa a tensão de entrada, R_{LD} é a soma da resistência série equivalente do indutor R_L e do diodo R_D . R_{LSW} é a soma da resistência série equivalente do indutor R_L e do interruptor R_{SW} . V_o é tensão de saída do conversor, L é a indutância, i_o é a corrente inicial no indutor no momento da comutação e N o número de células *boost*. [8].

$$i_L(t_{off}) = \frac{V_{in}}{R_{LD}} - \frac{e^{-\frac{t(R_{LD})}{L}} (L V_{in} + (V_o + L i_o) R_{LD})}{L (R_{LD})} \quad (4)$$

$$i_L(t_{on}) = \frac{V_{in}}{R_{LSW}} + \frac{e^{-\frac{t(R_{LSW})}{L}} (i_o R_{LSW} - V_{in})}{R_{LSW}} \quad (5)$$

$$R_{LD} = R_L + R_D; \quad R_{LSW} = R_L + R_{SW}$$

$$I_{in} = \sum_{n=1}^N i_L(n) \quad (6)$$

As equações 7 e 8 representam a tensão no barramento e filtro de saída do conversor para os períodos de carga e descarga do capacitor, respectivamente. R_{Co} é a soma da resistência série equivalente do capacitor R_C e da representação da carga R_o , $i_D(t_{off})$ é a corrente no diodo [8].

$$v_o(carga) = \#1 + \frac{R_o e^{-\frac{t}{C(R_{Co})}} (I_{in} R_o + V_C^0 C R_{Co})}{C R_{Co}^2} \quad (7)$$

$$V_o(descarga) = \#2 + \frac{R_o e^{-\frac{t}{C(R_{Co})}} (i_D(t_{off}) R_o + C V_C^0 R_{Co})}{C (R_{Co})^2} \quad (8)$$

$$\#1 = \frac{I_{in} R_C R_o \delta(t)}{R_{Co}}; \quad \#2 = \frac{i_D(t_{off}) R_C R_o \delta(t)}{R_{Co}}; \quad R_{Co} = R_C + R_o$$

A corrente no capacitor do filtro de saída, no momento de carga do capacitor, é dada pela diferença da somatória das correntes conduzidas pelos diodos e da corrente circulante pela carga, conforme equação 9. Já equação 10 modela a corrente no momento de descarga do capacitor, V_C^0 representa a tensão do capacitor no momento da comutação do interruptor.

$$i_c(carga) = \sum_{n=1}^N i_D(n) - \frac{V_o}{R_o} \quad (9)$$

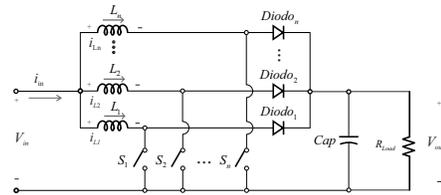
$$i_c(descarga) = \frac{V_C^0 e^{-\frac{R_C t}{C R_o}}}{R_o} \quad (10)$$

A corrente no capacitor do filtro de entrada é: 11 onde: R_{se} é a resistência série equivalente do capacitor do filtro, R_r a resistência do PV, C_{fi} é a capacitância, ($\omega = 2 \times \pi \times f_s$).

$$I_{fi} = \frac{V_{pv} - I_{in} R_r}{R_{se} + R_r - \frac{j}{C_{fi} \omega}} \quad (11)$$

Com as equações supracitadas é possível modelar o comportamento das grandezas de tensão e corrente nos elementos que compõem o conversor *boost* de uma célula e intercalado 10. E assim calcular as perdas, e suas respectivas resistências série equivalente. através das equações utilizadas em [8]

Figura 10: Conversor *boost* com N-Células.



Além disso, conhecendo a dinâmica de entrada e saída do conversor, referentes a tensão e corrente é possível calcular a variação das perdas ao longo do período em que o sistema está processando energia[18]. Faz-se então a varredura utilizando diferentes combinações de frequência (f_s), Amplitude de ondulação (ΔI_{in}) e densidade de corrente (J) para o ponto de operação ($f_s @ \Delta I_{in} @ J$) para cada arranjo de componentes, cujas tecnologias apresentem a melhor eficiência global. Para isso são utilizados bancos de dados com tecnologias de: semicondutores, núcleo magnéticos, condutores, capacitores, elementos que compõem o conversor. A escolha é o arranjo cujo ponto de operação exprimam os melhores resultados frente a uma função objetivo pré especificada. [8], [13].

Os capacitores utilizado são *TDK Group Company*, com tensão de 160V para o filtro de entrada ($22-680\mu F$) e de 450V para o filtro de saída ($47-1500\mu F$). Os núcleos magnéticos, utilizados na projeto do indutor, são da *Magnetics* onde foram analisada as tecnologias: *High Flux*, *Molypermalloy*

e *Kool Mμ*. Os dissipadores de calor utilizados são da *HS dissipadores* [8], [13]. Os interruptores e diodos inseridos no banco de dados, para seleção da metodologia de otimização, são discriminados nas tabelas II e III, respectivamente. As metodologia de cálculo de perdas dos elementos que compõem o conversor, são apresentados em: [19], [20], [21].

Tabela II: Interruptores adicionadas ao banco de dados.

Part Number	[V]	[A]	$R(25^{\circ}C.)$	Fab.
IPA60R120C7	650	07(100°C)	120[mΩ]	Infineon
IPP60R099C7	650	14(100°C)	099[mΩ]	Infineon
IXKC23N60C5	600	16(90°C)	090[mΩ]	IXYS
STP36N60M6	600	19(100°C)	099[mΩ]	STMicroelectronics
IPW60R070CFD7	650	20(100°C)	070[mΩ]	Infineon
IPP60R022S7XKS	600	22(100°C)	022[mΩ]	Infineon

Tabela III: Diodos adicionados ao banco de dados

Part Number	[V]	[A]	Fab.
IDH09G65C5	650	09 (145°C)	Infineon
IDW10G65C5	650	10 (130°C)	Infineon
IDW15G65C5	650	15 (130°C)	Infineon
IDH16G65C5	650	16 (135°C)	Infineon
IDW24G65C5	650	24 (120°C)	Infineon
IDW30G65C5	650	30 (115°C)	Infineon

A metodo desenvolve projetos com diferentes arranjos de componentes para uma combinação de pontos de operação, cujos parâmetros são apresentados na Tabela IV.

Tabela IV: Parâmetros investigados na otimização.

Parâmetros	Valores
Tensão de saída	400 V
Intervalo de f_s investigado	[5 a 200] kHz
Intervalo de ΔI_L Investigado	[2,5 a 175] %
Intervalo de J investigado	[150 a 600] $\frac{A}{m^2}$
Intervalo de Empilhamento de Núcleos	[1 a 5]
Intervalo de Capacitores em Paralelo	[1 a 5]
Máximo ΔV_{out}	1 %
Resistência de Gate	10 Ω
Máxima T_j do Interruptor	120 °C
Máxima T do Indutor	100 °C

Tabela V: Coponentes escolhidos pelo metodo de otimização.

Celulas	Interruptor	Diodo	Núcleo	Condutor	$C_{in}[\mu F]$	$C_{out}[\mu F]$
1	IPA60R120C7	IDW30G65C5 (3x)55868	AWG16	(5x) 22	(5x) 47	
2	IPP60R022S7XKS	IDW24G65C5 (2x)55090	AWG18	(4x) 22	(4x) 47	
3	IXKC23N60C5	IDW15G65C5 (1x)55090	AWG17	(2x) 22	(2x) 47	
4	IPW60R070CFD7	(1x)55090	AWG18	(3x) 22	(2x) 47	

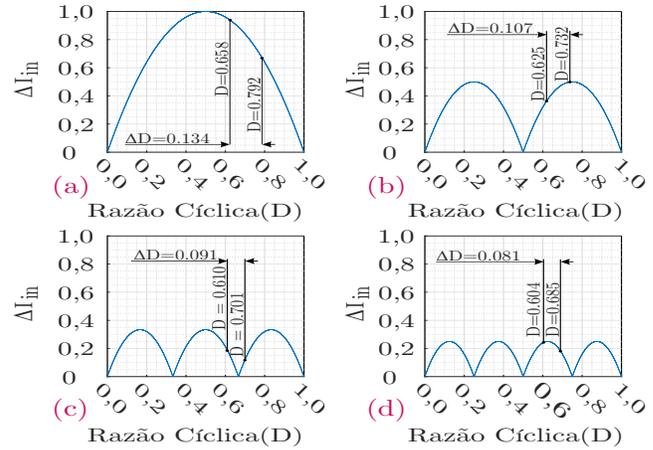
Tabela VI: Ponto de operação definido na otimização.

Celulas	$f(kHz)$	$\Delta I_{in}(\%)$	$\Delta I_L(\%)$	J
1	28	16	16	185
2	33	20	8,57	210
3	27	27,5	9,89	230
4	24	32,5	9,47	220

Fig. 11(a) representa ondulação de corrente de entrada normalizada para o conversor: *boost* classico; Fig. 11(a, b, c) *boost* Intercalados de duas à quatro células. Estes projetos, são resultado da escolha do conjunto de tecnologias no ponto de operação ($f_s @ \Delta I_{in} @ J$), cujo arranjo apresente maior eficiência. A faixa de variação de razão cíclica possuem diferenças nas tanto no tamanho quanto nos pontos iniciais e finais da razão cíclica, quando comparadas as ondulações das diferentes

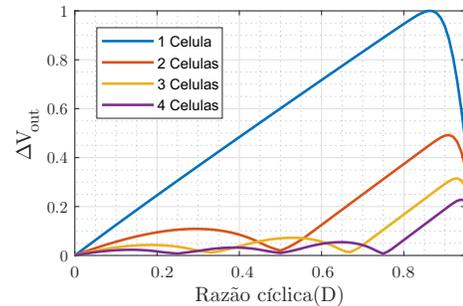
topologias. Isso se dá devido à redução de ganho estático, provocado pelas perdas nos componentes do conversor. Quanto mais expressiva for a potência dissipada nos componentes, maior será o incremento de razão cíclica necessário para que o conversor alcance o ganho especificado em projeto.

Figura 11: Ondulação da corrente de entrada normalizada



Nota-se a redução na amplitude máxima da ondulação da corrente de entrada do conversor proporcional ao aumento do número de células. Ao observarmos a amplitude desta ondulação para determinadas faixas de operação há casos em que um menor número de células intercaladas apresenta menor ondulação de corrente. Conhecendo estas métricas, é possível elaborar projetos mais precisos de filtros, que em muitos casos podem ser expressivamente reduzidos tanto nos seus valores de capacitância e/ou indutância, quanto em seu volume e custo. Fenômeno que também pode ser observado na Fig.12, onde é apresentada a variação da amplitude da ondulação de tensão de saída normalizada para os conversores *boost* de uma a quatro células.

Figura 12: Ondulação da tensão de saída normalizada



A Tabela VII apresenta o ponto de razão cíclica onde ocorre a máxima amplitude da ondulação de tensão para as topologias do tipo *boost* estudadas. Além disso mostra a proporcionalidade de capacitâncias necessárias para que a ondulação da tensão de saída valores próximos em ambos projetos. Em um primeiro momento foi mantida a mesma capacitância e é perceptível que a menor, máxima ondulação de tensão é o que possui três células em paralelo, seguido pela topologia com quatro células com uma amplitude ligeiramente menos e na sequencia, com amplitudes expressivamente maiores o de duas e uma célula. Posteriormente foi aumentado a capacitância até que os valores percentuais de ondulação fossem semelhantes,

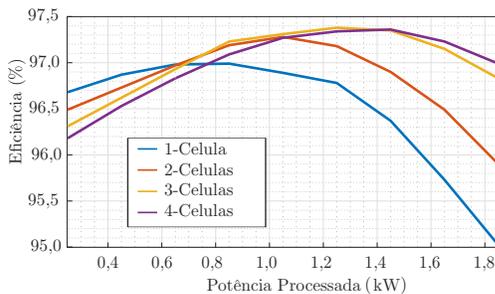
é clara o aumento da capacitância. No de duas células, é de aproximadamente sete vezes quando comparada a de três e quatro células. Já a de uma célula chega a ser de dezoito vezes maior. Permitindo assim a escolha de um projeto que tenha filtros bem menores.

Tabela VII: Ponto de razão cíclica da maior amplitude de ondulação de tensão.

Celulas	Razão cíclica (D)	$n \times Cap$	ΔV_{out_max}	$ n \times Cap$	ΔV_{out_max}
1	0.792	1	36,65%	18,0	2,37%
2	0.732	1	14,22%	7,0	2,10%
3	0.610	1	2,11%	1	2,11%
4	0.625	1	2,13%	1	2,13%

A Fig. 13 apresenta a eficiência do conversor ao longo de toda faixa de variação de potência, Fig.9, atrelada a variação de tensão Fig.9. Com os dados da dinâmica da tensão e potência, fornecida pela fonte, é possível prever de forma mais precisa os estresses e perdas geradas nos elementos do conversor. Os estresses provocados pela tensão e/ou corrente circulantes e/ou bloqueadas, geram perdas que aquecem os elementos e mudam as características do conversor ao longo do período de processamento de energia. Para reduzir incertezas quanto a variações térmicas são incluídos na metodologia de otimização a temperatura ambiente e sua variação provocada pelas perdas nos componentes do conversor. Além disso é feita uma média ponderada da eficiência dos conversores, conforme apresentado em [11]

Figura 13: Curvas da eficiência dos conversores



Ao observar detalhadamente a Fig.13, para menores potências os conversores com menor número de células apresentam maior eficiência e vice versa. Todavia, o que apresenta menores perdas no maior período de operação é o com três células, o que de antemão tende a indicar qual é a melhor opção.

IV. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia de projeto customizado e otimizado de conversores CC-CC. Tendo como estudo de caso um conversor *boost* onde se faz a escolha do arranjo de tecnologias, ponto de operação, número de células que apresenta maior eficiência e que possibilitem filtros de tamanho reduzido. As etapas para elaboração de um projeto adequado deve levar em consideração o comportamento da fonte geradora, tecnologias disponíveis, e também esteja dentro de uma faixa de preço que torne o produto atrativo. Para isso, é necessário conhecer os parâmetros que atuam na dinâmica da fonte de entrada, como variação da temperatura e irradiância solar para painéis fotovoltaicos. Esta análise deve compreender o máximo de possíveis variações ao longo da vida útil do equipamento. Isto possibilita escolher adequadamente a

topologia que melhor se adéqua a aplicação, que para este caso foi o conversor *boost* intercalado com três células em paralelo. Além disso, conhecendo estas métricas, é possível elaborar projetos mais precisos de filtros, que em muitos casos podem ser expressivamente reduzidos tanto nos seus valores de capacitância e/ou indutância, quanto em seu volume e custo, o que pôde ser observado na menor amplitude de ondulação de corrente da entrada e tensão de saída da topologia escolhida.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão ao INCTGD e aos órgãos financiadores CNPq(processo 465640/2014-1), CAPES(processo 23038.000776/2017-54) e FAPERGS(17/2551-0000517-1) pelo incentivo a pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] J. F. Peters, M. Baumann, B. Zimmermann, J. Braun, and M. Weil, "The environmental impact of li-ion batteries and the role of key parameters—a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 67, pp. 491–506, 2017.
- [2] M. Kumar, "Social, economic, and environmental impacts of renewable energy resources," *Wind Solar Hybrid Renewable Energy System*, 2020.
- [3] F. Blaabjerg, K. Ma, and Y. Yang, "Power electronics - the key technology for renewable energy systems," 03 2014, pp. 1–11.
- [4] M. Molina, "Energy storage and power electronics technologies: A strong combination to empower the transformation to the smart grid," *Proceedings of the IEEE*, vol. PP, pp. 1–29, 09 2017.
- [5] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G. P. Hancke, "Smart grid technologies: Communication technologies and standards," *IEEE transactions on Industrial informatics*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2011.
- [6] M. C. Brown, *Practical switching power supply design*. Elsevier, 2012.
- [7] F. L. Tofoli, D. de Castro Pereira, W. J. de Paula, and D. d. S. O. Júnior, "Survey on non-isolated high-voltage step-up dc–dc topologies based on the boost converter," *IET power Electronics*, vol. 8, no. 10, pp. 2044–2057, 2015.
- [8] É. Bridi *et al.*, "Metodologia de otimização de conversores estáticos com paralelismo de células boost aplicado a célula a combustível," 2019.
- [9] E. Wang, "Current ripple factor of a buck converter," *Application Note AN009*, 2014.
- [10] É. Bridi, M. J. Tiburski, W. de Azevedo Ayres, H. C. Sartori, and J. R. Pinheiro, "Otimização de conversores boost intercalado de alto ganho de tensão e alta eficiência."
- [11] F. Beltrame *et al.*, "Metodologia de projeto otimizado de conversores estáticos aplicados a sistemas fotovoltaicos," Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
- [12] L. C. Pivetta, H. C. Sartori, and J. R. Pinheiro, "Pre-sizing of power converters using genetic algorithms," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 2, pp. 654–661, 2018.
- [13] M. J. TIBURSKI, É. BRIDI, H. C. SARTORI, and J. R. PINHEIRO, "Projeto de um conversor boost com alto ganho e alto rendimento aplicado a célula combustível," *Anais da Sociedade Brasileira de Automática*, vol. 1, no. 1, 2019.
- [14] ENF. (2021) Solar trade platform and directory of solar companies. [Online]. Available: <https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/45787>
- [15] INMET. (2020) Instituto nacional de meteorologia- dados historicos anuais. [Online]. Available: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>
- [16] W. Charles Lawrence Kamuyu, J. R. Lim, C. S. Won, and H. K. Ahn, "Prediction model of photovoltaic module temperature for power performance of floating pvs," *Energies*, vol. 11, no. 2, p. 447, 2018.
- [17] A. Luque and S. Hegedus, *Photovoltaic science and engineering*. Wiley Online Library, 2003.
- [18] B. G. Lipták, *Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis*. CRC press, 2003, vol. 1.
- [19] É. Bridi, E. de Oliveira Prado, H. C. Sartori, J. R. Pinheiro, M. J. Tiburski, and P. C. Bolsi, "Otimização de conversores boost intercalado de alto ganho de tensão e alta eficiência," *OTIMIZAÇÃO DE CONVERSORES BOOST INTERCALADO DE ALTO GANHO DE TENSÃO E ALTA EFICIÊNCIA*, pp. 1–388.
- [20] E. O. Prado, É. Bridi, H. C. Sartori, J. R. Pinheiro, M. J. Tiburski, and P. C. Bolsi, "Metodologia de projeto de conversores boost para aplicações de alta eficiência e elevado ganho de tensão," *METODOLOGIA DE PROJETO DE CONVERSORES BOOST PARA APLICAÇÕES DE ALTA EFICIÊNCIA E ELEVADO GANHO DE TENSÃO*, pp. 1–388.
- [21] M. José Tiburski, É. Bridi, H. C. Sartori, and J. R. Pinheiro, "Analysis and design of a high step-up boost converter applied to fuel cell," in *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. IEEE, 2018, pp. 817–824.