

ESTUDO COMPARATIVO DE CÉLULAS ELEVADORAS DE TENSÃO APLICADAS AO CONVERSOR SEPIC ISOLADO

Bernardo Andres, Pablo F. S. Costa, Luciano Schuch

GEPOC
Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
adoandres, pablofscosta, schuch.prof
{@gmail.com}

Leandro Roggia
CTISM

Universidade Federal de Santa Maria
Santa Maria, Brasil
roggia@gmail.com

Fabrcio Hoff Dupont
GDT

Universidade Comunitria da Regio
de Chapeco
Chapeco, Brasil
fhdupont@gmail.com

Resumo — Este artigo apresenta um comparativo te6rico de c6lulas elevadoras de tens6o utilizadas para aumentar o ganho est6tico de um conversor SEPIC isolado. Para isto, uma breve justificativa acerca do uso deste conversor CC-CC 6 realizada, atrav6s de uma an6lise apresentando os pr6s e contras com outras topologias isoladas de uma chave. Este conversor ser6 utilizado como o primeiro est6gio de um microinversor fotovoltaico. As c6lulas exploradas consistem na combina6o de diodos, capacitores e indutores, podendo ser empregadas no prim6rio, secund6rio ou em ambos os lados simultaneamente. Desta maneira, a escolha pelas combina66es para esta aplica6o dar-se-6 pela an6lise do ganho est6tico, esfor6os sobre semicondutores e o impacto sobre os principais par6metros do elemento magn6tico isolador.

Palavras-chave — C6lula elevadora, microinversor fotovoltaico, SEPIC isolado.

I. INTRODU6O

Microinversores fotovoltaicos (FVs) conectados 6 rede el6trica utilizam apenas um m6dulo ou um pequeno conjunto de m6dulos em s6rie conectados a um 6nico inversor. Para o primeiro caso, na configura6o de m6dulo integrado (MIC), um conversor CC-CC de elevado ganho est6tico 6 conectado a um conversor CC-CA. Esta configura6o apresenta a

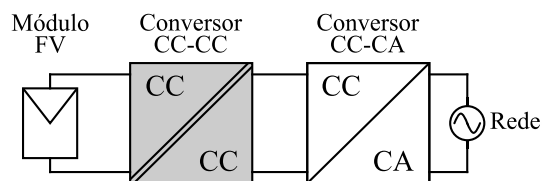


Figura 1. Microinversor fotovoltaico.

característica “*plug and play*”, modularidade, confiabilidade e elevada efici6ncia energ6tica [1]. Devido 6 necessidade de elevar o baixo n6vel de tens6o de um m6dulo FV para um valor acima do pico da rede el6trica, o transformador (ou indutor acoplado) pode ser utilizado para garantir a isolamento entre o m6dulo e a rede el6trica, garantindo maior seguran6a, mitiga6o dos problemas relacionados 6 corrente de fuga e aux6lio na eleva6o do ganho est6tico atrav6s de sua rela6o de transforma6o. O esquem6tico simplificado do microinversor, com 6nfase no primeiro est6gio, 6 apresentado na Figura 1.

Devido 6 baixa pot6ncia m6xima de um m6dulo fotovoltaico, os conversores isolados com apenas uma chave tornam-se mais atrativos pela redu6o de custo e volume, al6m de menor complexidade devido ao acionamento de um 6nico semicondutor. Os principais a serem citados nesta categoria s6o: *flyback*, ZETA, SEPIC e C6uk, mostrados na Figura 2.

O *flyback* 6 uma topologia bastante explorada devido ao

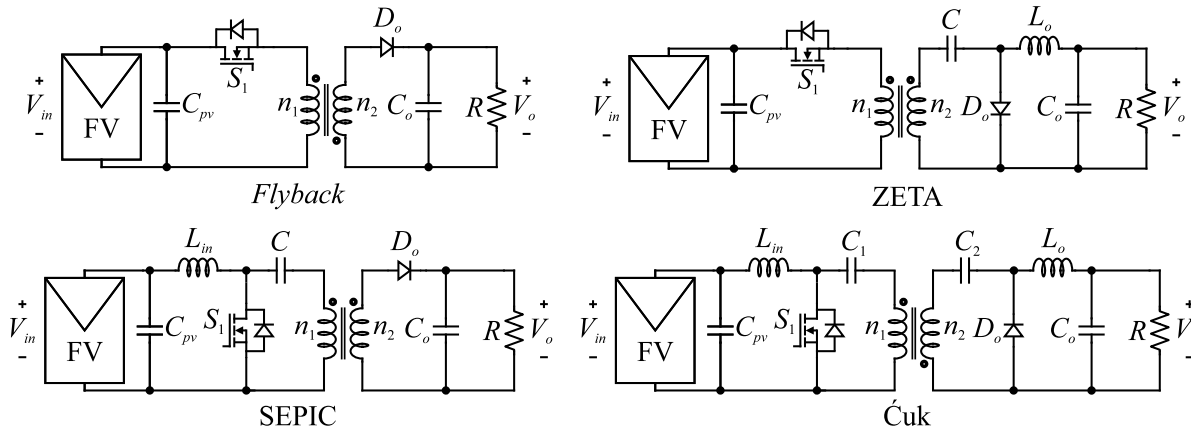


Figura 2. Topologias isoladas de conversores CC-CC utilizando uma 6nica chave.

reduzido número de componentes, porém, apresenta problemas devido à elevada dispersão de seu indutor acoplado e corrente de entrada descontínua (característica pouco atrativa para esta aplicação). O conversor ZETA, apesar de mitigar um pouco os problemas quanto à elevada dispersão, também apresenta entrada descontínua. O Ćuk é mais atrativo do que os anteriores por possuir entrada contínua e, principalmente, por naturalmente utilizar um transformador (sendo a única topologia com essa característica), pois possui capacitores em ambos os lados e o valor médio da corrente é nulo no indutor magnetizante. No entanto, é uma topologia com mais componentes do que as demais. Por fim, o conversor SEPIC apresenta entrada contínua e valor médio da corrente no indutor magnetizante inferior ao ZETA e *flyback*, além da possibilidade de implementação com transformador para algumas células específicas e número de componentes inferior ao Ćuk [2].

A partir disso, este artigo busca apresentar as células existentes na literatura que auxiliam no aumento do ganho estático, mostrando as diversas combinações, bem como as suas vantagens e desvantagens, aplicadas ao conversor SEPIC isolado. Gráficos e tabelas são utilizados como ferramentas comparativas, além de ser feita uma abordagem sucinta acerca do uso de indutor acoplado ou transformador de acordo com a célula analisada. Este fator é de suma relevância na escolha pelas topologias mais adequadas à esta aplicação. Cabe ressaltar que a análise não abordará combinações que utilizem chaves semicondutoras, como é o caso do indutor chaveado ativo, pois o objetivo é o de utilizar uma única chave semicondutora, além de não considerar a adição de enrolamentos e indutores acoplados ao circuito, pois já existe um elemento magnético isolador.

II. CÉLULAS ELEVADORAS DE TENSÃO

De acordo com [3], o ganho estático de um SEPIC isolado é dado por (1).

$$G_{\text{SEPIC}} = \frac{nD}{1-D}, \quad (1)$$

onde n é a relação de transformação, n_2/n_1 , e D é a razão cíclica do conversor. Considerando todos os componentes sendo ideais, através das leis das tensões de *Kirchhoff* (LTK) deduz-se que o esforço de tensão sobre a chave é $V_{DS} = V_{in}/(1-D)$, enquanto que sobre o diodo é $V_{Do} = nV_{DS}$ [3]. Estes parâmetros são de suma importância tanto para o volume e custo dos semicondutores, quanto para o rendimento do conversor.

Nas subseções seguintes serão apresentadas algumas das principais células a serem aplicadas neste conversor.

A. Células utilizadas no primário

As possíveis células a serem utilizadas no primário são mostradas na Figura 3. A utilização delas no conversor é apresentada na Figura 4. Com base em [4], as principais escolhas para este caso são baseadas em indutores chaveados (SL – *Switched inductor*) e células quadráticas, como a R²P² (*Reduced redundant power processing*) e a multiplicadora utilizada no *boost* quadrático, a VMC (*Voltage multiplier cell*) quadrática. A célula *self-lift* SL pode ser expandida para sua versão duplicada, porém, não será apresentada devido ao elevado *stress* de tensão causado na chave. Os ganhos das células, bem como seu funcionamento, podem ser extraídos a partir de [5], [6] e [7], levando em conta o ganho apresentado em (1).

Assim, a Tabela 1 apresenta um breve comparativo entre essas células. É importante frisar que o ganho da célula impacta diretamente no esforço de tensão sobre a chave e, consequentemente, sobre o diodo de saída, cujo esforço de tensão continua sendo a tensão V_{DS} refletida ao secundário. A obtenção do ganho estático do conversor é realizada através da multiplicação de (1) pelo ganho da célula. Assim, na Figura 5 são apresentadas as curvas do ganho estático do conversor para

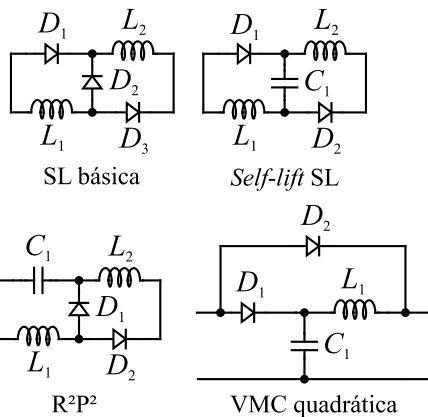


Figura 3. Células elevadoras de tensão utilizadas no primário.

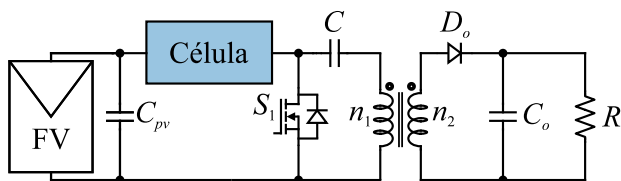


Figura 4. Configuração do SEPIC isolado com células no primário.

Tabela 1. Comparativo entre células aplicadas no primário do conversor.

Célula	Ganho	V_{DS}	V_{Do}
SL básica	$(1+D)$	$(1+D)V_{in}/(1-D)$	$n(1+D)V_{in}/(1-D)$
<i>Self-lift</i> SL	2	$2V_{in}/(1-D)$	$n2V_{in}/(1-D)$
R ² P ²	$1/(1-D)$	$V_{in}/(1-D)^2$	$nV_{in}/(1-D)^2$
VMC ²	$1/(1-D)$	$V_{in}/(1-D)^2$	$nV_{in}/(1-D)^2$

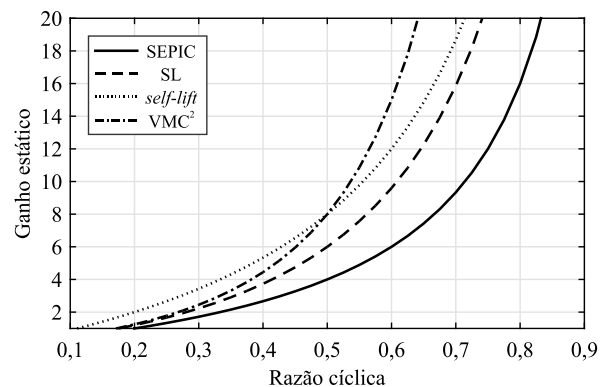


Figura 5. Curvas de ganho estático para cada célula utilizada no primário.

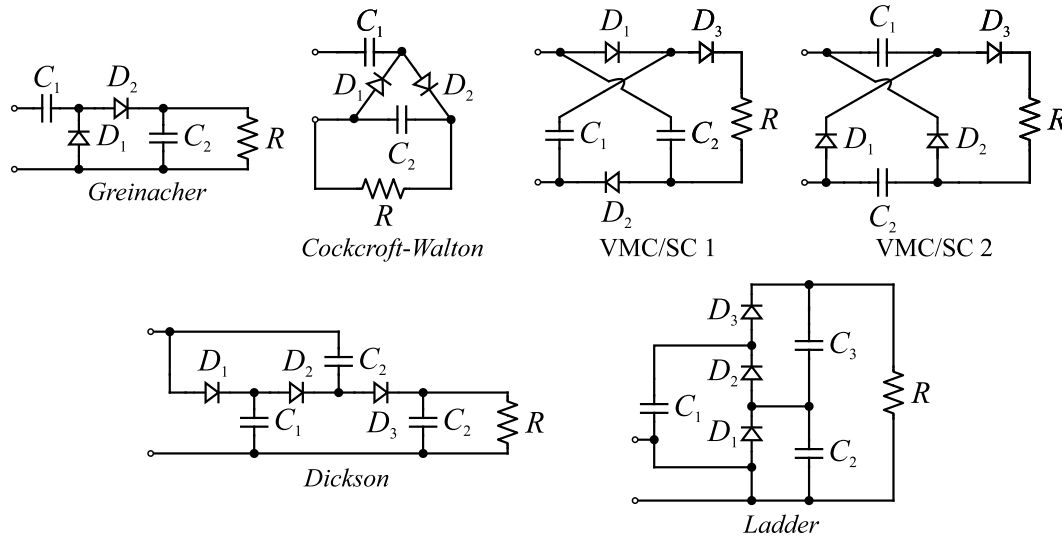


Figura 6. Células elevadoras de tensão utilizadas no secundário.

cada uma das células, utilizando um $n = 4$, um valor encontrado em topologias semelhantes, para o mesmo tipo de aplicação [8]-[9]. Apenas a célula VMC quadrática foi apresentada, pois ela possui o mesmo ganho da R^2P^2 .

Como é possível observar na Tabela 1, os esforços sobre os semicondutores tendem a ser elevados, fazendo com que o uso destas células seja pouco atrativo. Além disso, considerando algumas não idealidades, como o indutor de dispersão do transformador e o capacitor intrínseco do próprio diodo, este componente terá *spikes* de tensão. Por fim, o valor médio da corrente nos indutores e diodos das células também é alto, elevando as perdas em condução da topologia. Quanto aos ganhos, observa-se que para $D < 0,5$, a *self-lift* é mais vantajosa, enquanto que para $D > 0,5$, a VMC quadrática proporciona um ganho estático maior do que as demais.

B. Células utilizadas no secundário

Com base em [3] e [8], as principais células a serem

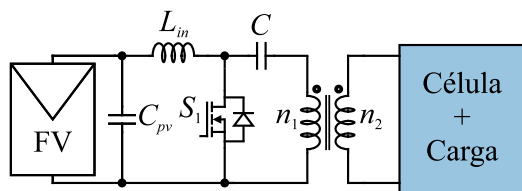


Figura 7. Configuração do SEPIC isolado com células no secundário.

Tabela 2. Comparativo entre células aplicadas no secundário do conversor.

Célula	Ganho	V_{DS}	V_{Do}
<i>Greinacher</i>	$1/D$	$V_{in}/(1-D)$	V_o
CW	$1/D$	$V_{in}/(1-D)$	V_o
SC 1	$(1+D)/D$	$V_{in}/(1-D)$	$nV_{in}/(1-D)$
SC 2	$(2-D)/D$	$V_{in}/(1-D)$	$nV_{in}/(1-D)$
<i>Dickson</i>	$(1+D)/D$	$V_{in}/(1-D)$	$nV_{in}/(1-D)$
<i>Ladder</i>	$(1+D)/D$	$V_{in}/(1-D)$	$nV_{in}/(1-D)$

utilizadas no secundário são apresentadas na Figura 6. Basicamente, elas são constituídas apenas pela combinação de diodos e capacitores, sem o acréscimo de elementos magnéticos. A denominação VMC/SC (*Switched capacitor – capacitor chaveado*) foi adotada pelo fato de não haver um nome específico, diferentes das demais. As células *Greinacher* e *Cockcroft-Walton* (CW) são denominadas como dobradoras, e, apesar de possuírem a mesma estrutura (e funcionamento), são apresentadas separadamente, pois nas suas versões expandidas possuem etapas de operação distintas. As células *Dickson*, *Ladder* e as VMC/SC são conhecidas como triplicadoras e possuem diferenças quanto as etapas de operação. A utilização delas no conversor é apresentada na Figura 7.

Os ganhos de cada uma delas, bem como seu funcionamento, podem ser extraídos a partir das informações encontradas em [5], [9] e [10], levando em conta o ganho apresentado em (1). Assim, a Tabela 2 apresenta um comparativo entre os ganhos e esforços de tensão sobre os semicondutores. Na Figura 8 são apresentadas as curvas de ganho estático do conversor para $n = 4$. É importante frisar que, em virtude de algumas células possuírem o mesmo ganho, apenas três curvas são mostradas.

É possível observar a similaridade entre as células dobradoras e triplicadoras, com exceção da VMC/SC 2. Isto se deve ao fato de que a operação é contrária à VMC/SC 1, ou

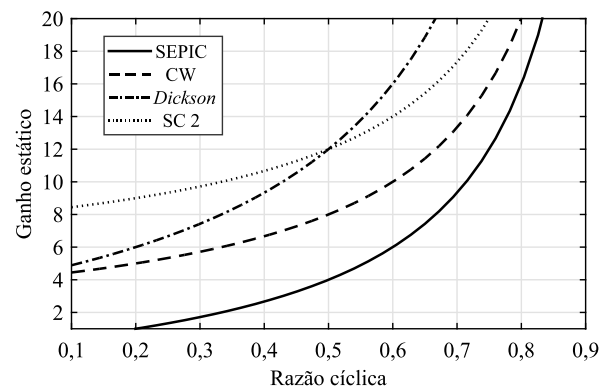


Figura 8. Curvas de ganho estático para cada célula utilizada no secundário.

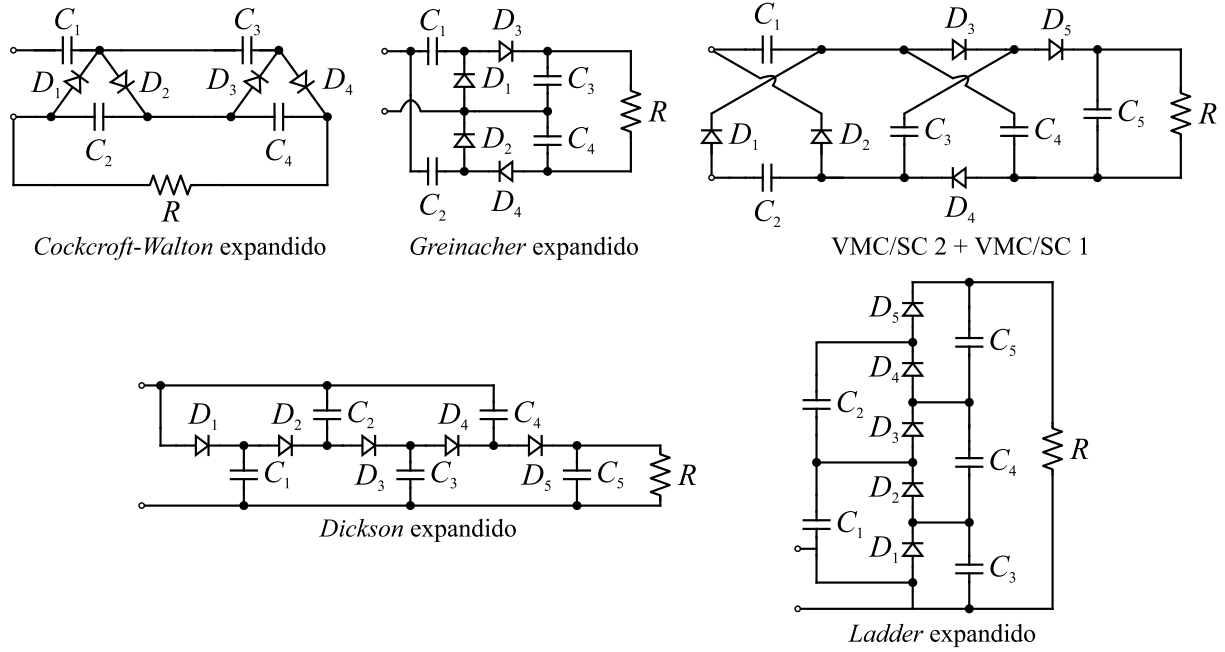


Figura 9. Células elevadoras de tensão expandidas utilizadas no secundário.

seja, enquanto os capacitores de uma célula (C_1 e C_2) estão sendo descarregados, os da outra estão sendo carregados. Esta diferença pode ser observada a partir das curvas do ganho estático. Novamente, o ganho estático do conversor é obtido a partir da multiplicação de (1) pelo ganho das células. É possível ver na Tabela 2 que os esforços nos semicondutores tendem a ser inferiores aos apresentados na Tabela 1, no entanto, V_{Do} é maior nas células dobradoras.

Como é possível constatar, a partir da análise da Figura 8, os ganhos proporcionados por estas células são superiores às utilizadas no primário, considerando uma faixa de razão cíclica de até 0,5, um valor bastante usual, como visto em [11] e [12], de modo a não elevar significativamente as perdas na chave e nos diodos. Entre as células, a triplicadora VMC/SC 2 possui o maior ganho para $D < 0,5$, enquanto que as demais triplicadoras possuem ganho superior para $D > 0,5$. Considerando o indutor de dispersão do transformador, a ressonância desta mesma com os capacitores pode limitar os picos de corrente da carga destes elementos, fenômeno também conhecido por *inrush current*. Essa ressonância pode proporcionar comutação sob zero de corrente (ZCS – *Zero current switching*) em um ou dois diodos, como no caso da VMC/SC 2, na qual a carga dos dois capacitores acontece de maneira ressonante, com os diodos da célula, D_1 e D_2 , conduzindo esta corrente ressonante. Por fim, os *spikes* de tensão sobre o diodo de saída acabam sendo mitigados pela presença dos capacitores. Desta maneira, a utilização das células no secundário são uma alternativa mais atrativa para esta aplicação.

C. Expansão das células utilizadas no secundário

Existem diversas opções de combinações entre células, incluindo o uso simultâneo no primário e secundário. Nesta subseção, serão abordadas as expansões mais tradicionais e consolidadas na literatura, conforme apresentado na Figura 9, com a inclusão da carga resistiva, R . Além das estruturas

apresentadas, pode-se combinar as células triplicadoras com as dobradoras de diferentes maneiras, obtendo-se células quadruplicadoras, e também triplicadoras com outras triplicadoras, obtendo-se células quintuplicadoras. O ganho estático não será diferente do que é obtido com as que são apresentadas na Figura 9, porém, as etapas de operação são distintas. A partir de [9] e [13], os ganhos estáticos podem ser obtidos, bem como o funcionamento destas estruturas, sendo que para as células “pares” (i.e., dobradoras, quadruplicadoras e assim por diante), a relação de ganho é dada por

$$G_{par} = \frac{N_c}{D}, \quad (2)$$

onde N_c é o número de células, ou seja, a expansão do CW para uma estrutura quadruplicadora acarretaria em $G_{par} = 2/D$. Do mesmo modo, para as células triplicadoras expandidas, como é o caso de *Dickson* e *Ladder*, a relação de ganho é

$$G_{impar1} = \frac{(N_c + D)}{D}. \quad (3)$$

Por fim, para o caso onde as células VMC/SC 1 e VMC/SC 2 são agrupadas, a relação de ganho é apresentada em (4).

$$G_{impar2} = \frac{(N_c + 1 - D)}{D}. \quad (4)$$

Desta maneira, a Tabela 3 apresenta um comparativo entre os ganhos e os esforços sobre os semicondutores. Apenas três células estão sendo comparadas, devido aos mesmos ganhos e esforços das demais, tal qual fora constatado na Tabela 2. O ponto positivo das estruturas quadruplicadoras é a redução do *stress* de tensão sobre os diodos. As curvas de ganho estático com $n = 4$ são apresentadas na Figura 10. Como era esperado, a combinação das células VMC/SC 2 e VMC/SC 1 gerou o maior ganho para $D < 0,5$, enquanto que as demais quintuplicadoras proporcionam os maiores ganhos para $D > 0,5$. É importante

Tabela 3. Comparativo entre células expandidas aplicadas no secundário do conversor.

Célula	Ganho	V_{DS}	V_{Do}
CW 2x	$2/D$	$V_{in}/(1-D)$	$V_o/2$
Dickson 2x	$(2+D)/D$	$V_{in}/(1-D)$	$nV_{in}/(1-D)$
SC 2 + SC 1	$(3-D)/D$	$V_{in}/(1-D)$	$nV_{in}/(1-D)$

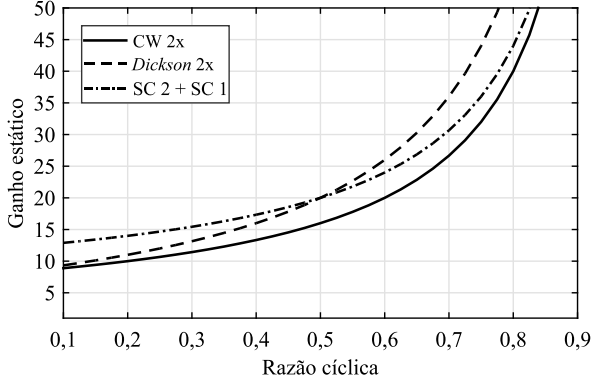


Figura 10. Curvas de ganho estático para cada célula expandida.

ressaltar que as expansões das células para ordens mais elevadas, a fim de se obter ganhos superiores aos apresentados na Tabela 3, podem ser realizadas, porém, o uso do transformador já auxilia a elevar a tensão do módulo fotovoltaico, não sendo necessário para a aplicação com este conversor. Para avaliar as possíveis comutações suaves e vantagens e desvantagens de cada topologia, uma análise mais aprofundada deve ser feita para cada caso. Deste modo, a escolha pelas possíveis topologias mais vantajosas dar-se-á através de uma análise sucinta acerca do elemento magnético de isolamento.

III. IMPACTO DAS CÉLULAS NA CORRENTE MAGNETIZANTE

De acordo com [14], o circuito equivalente que representa um transformador de dois enrolamentos pode ser obtido através do modelo *cantilever*, apresentado de modo evidenciado no conversor SEPIC da Figura 11. Esse modelo apresenta o indutor próprio do enrolamento primário, também conhecido como indutor magnetizante, L_m , além do indutor de dispersão, L_{lk} . A versão isolada do conversor SEPIC possui um nível CC (corrente contínua) na corrente magnetizante, indicando a existência de um nível contínuo de fluxo e, portanto, existe armazenamento de energia em L_m , caracterizando o uso de um indutor acoplado, ao invés de um transformador, conforme explanado em [15].

Assim, resumidamente, um transformador bem projetado possui elevada indutância magnetizante, corrente magnetizante com nível CC praticamente nulo e, conseqüentemente uma

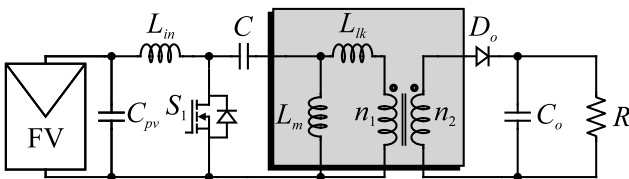


Figura 11. Conversor SEPIC isolado com o modelo *cantilever*.

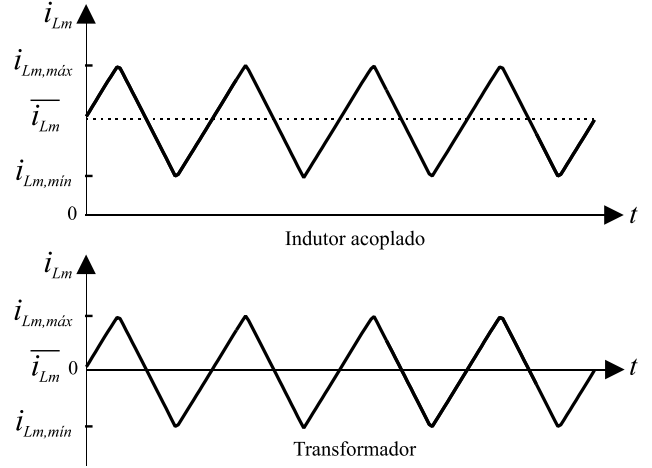


Figura 12. Comparativo da corrente magnetizante com indutor acoplado e transformador.

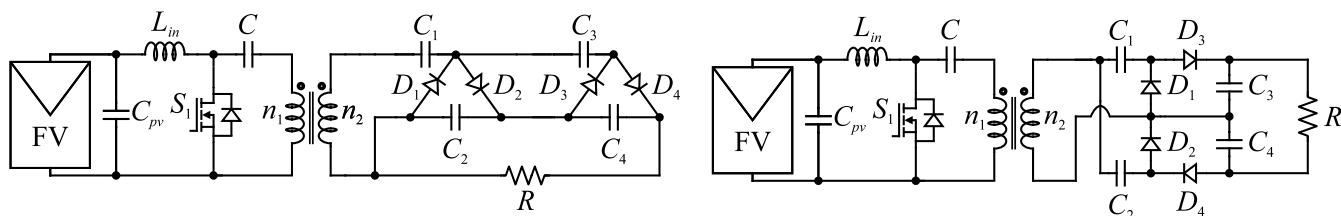
reduzida indutância de dispersão. Por outro lado, o indutor acoplado necessita de um *air gap* para armazenamento de energia, elevando a indutância de dispersão e reduzindo a indutância magnetizante. Esses fatores são indesejáveis pois elevam o *stress* de tensão sobre a chave e as perdas do conversor, além de elevar o volume do elemento magnético, devido ao menor aproveitamento da curva $B \times H$ [2]. Na Figura 12 são apresentadas a corrente magnetizante para um transformador e para um indutor acoplado, de modo a evidenciar visualmente as constatações realizadas acerca do nível CC nesta corrente.

Em [2], é realizada uma abordagem de modo a solucionar estes problemas. De maneira sucinta, parte-se do mesmo princípio do conversor *Ćuk*, onde o transformador é adicionado e o capacitor é dividido em dois, cada um em série com um enrolamento, garantindo um nível CC nulo e, conseqüentemente, sem armazenamento de energia em L_m . Este princípio pode ser avaliado com a inclusão das células apresentadas na Figura 6. Basicamente, as células dobradoras e suas expansões garantem que o fluxo de corrente, tanto no primário quanto no secundário do transformador, ocorra através de capacitores. Por outro lado, as triplicadoras e suas expansões não apresentam esta vantagem, apesar de garantirem a circulação de corrente de maneira simultânea, diferentemente da versão isolada tradicional do SEPIC. Este fato faz com que a energia armazenada seja inferior à topologia convencional, contudo, não soluciona o problema do uso do indutor acoplado, diferentemente das células “pares”.

Desta maneira, verifica-se que as células expandidas de *Greinacher* e *Cockcroft-Walton*, aplicadas ao SEPIC isolado, conforme apresentado na Figura 13, são as mais indicadas. Considerando a curva apresentada na Figura 10, elas apresentam um ganho estático elevado, dado por

$$G_{\text{SEPIC}_{\text{CW}}} = \frac{nD}{1-D} \frac{2}{D} = \frac{2n}{1-D}. \quad (5)$$

Com o uso destas células, não há necessidade de uma relação de transformação alta, assim, o conversor terá um número atrativo de componentes para esta aplicação, possibilidade de comutações suaves, mitigação de *spikes* nos diodos e, principalmente, o uso do transformador, proporcionando uma menor indutância de dispersão e maior



SEPIC isolado com *Cockcroft-Walton* expandido

SEPIC isolado com *Greinacher* expandido

Figura 13. Conversor SEPIC isolado com a inserção das células expandidas de *Cockcroft-Walton* e *Greinacher*.

indutância magnetizante com relação às outras células apresentadas.

IV. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um conjunto de células a serem utilizadas no conversor SEPIC isolado, de forma a contribuir com o aumento do seu ganho estático, elevando a tensão de um módulo fotovoltaico para um valor acima do pico da rede elétrica. As células utilizadas no primário são pouco atrativas por contribuírem para o aumento dos esforços de tensão sobre os diodos, além de inserirem indutores, sujeitos a níveis de corrente elevados. As células utilizadas no secundário mostraram-se mais adequadas para esta aplicação, sendo eficazes na mitigação dos problemas de *spike* nos diodos, sem a adição de elementos magnéticos.

A expansão destas células permite que o conversor opere com elevado ganho de tensão, sem a necessidade de utilizar uma relação de transformação alta. Por fim, as células “pares” apresentam a vantagem de permitir o uso de um transformador, pois não há nível CC na corrente magnetizante, portanto, não há energia armazenada no indutor magnetizante.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001, do INCTGD e órgãos financiadores (CNPq processo n° 465640/2014-1, CAPES processo n° 23038.000776/2017-54 e FAPERGS n° 17/2551-0000517-1).

REFERÊNCIAS

- [1] Carbone, R., Tomaselli, A., 2011. Recent advances on AC PV-modules for grid-connected photovoltaic plants, in Proc. IEEE 3rd International Conference on Clean Electrical Power: Renewable Energy Resources Impact, pp. 124–129.
- [2] Williams, Barry. (2016). Transformer Isolated Buck-Boost Converters. Renewable Energy and Sustainable Development. 2. 112-125. 10.21622/resd.2016.02.2.112.
- [3] Erickson, R. W., Maksimovic, D., 2001. Fundamentals of Power Electronics: 2nd Edition, Kluwer Academics Publishers.
- [4] M. Forouzesh, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg and B. Lehman, "Step-Up DC–DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, Dec. 2017.
- [5] B. Axelrod, Y. Berkovich and A. Ioinovici, "Switched-Capacitor/Switched-Inductor Structures for Getting Transformerless Hybrid DC–DC PWM Converters," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 55, no. 2, pp. 687-696, March 2008.
- [6] Y. Ye and K. W. E. Cheng, "Quadratic boost converter with low buffer capacitor stress," in *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 5, pp. 1162-1170, May 2014.

- [7] Y. Hsieh, J. Chen, T. Liang and L. Yang, "Novel High Step-Up DC–DC Converter for Distributed Generation System," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1473-1482, April 2013.
- [8] J. Yao, A. Abramovitz and K. M. Smedley, "Analysis and Design of Charge Pump-Assisted High Step-Up Tapped Inductor SEPIC Converter With an “Inductorless” Regenerative Snubber," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 10, pp. 5565-5580, Oct. 2015.
- [9] A. Alzahrani, M. Ferdowsi and P. Shamsi, "A Family of Scalable Non-Isolated Interleaved DC-DC Boost Converters With Voltage Multiplier Cells," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 11707-11721, 2019.
- [10] Ismail, Esam H. et al. "A Family of Single-Switch PWM Converters With High Step-Up Conversion Ratio." in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 55 (2008): 1159-1171.
- [11] B. Axelrod, Y. Berkovich, A. Shenkman and G. Golan, "Diode-capacitor voltage multipliers combined with boost-converters: topologies and characteristics," in *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 6, pp. 873-884, July 2012.
- [12] M. Forouzesh, K. Yari, A. Baghrarian and S. Hasanpour, "Single-switch high step-up converter based on coupled inductor and switched capacitor techniques with quasi-resonant operation," in *IET Power Electronics*, vol. 10, no. 2, pp. 240-250, 10 2 2017.
- [13] C. Young, M. Chen, T. Chang, C. Ko and K. Jen, "Cascade Cockcroft-Walton Voltage Multiplier Applied to Transformerless High Step-Up DC–DC Converter," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 523-537, Feb. 2013.
- [14] R. W. Erickson and D. Maksimovic, "A multiple-winding magnetics model having directly measurable parameters," *PESC 98 Record. 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (Cat. No. 98CH36196)*, Fukuoka, 1998, pp. 1472-1478 vol.2.
- [15] A. F. Witulski, "Introduction to modeling of transformers and coupled inductors," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 10, no. 3, pp. 349-357, May 1995.