

CONVERSOR DOUBLER OUTPUT COUPLED INDUCTOR PARA APLICAÇÕES DE FONTES ALTERNATIVAS.

Henrique J. Hoch*, Tiago M. K. Faistel†, Ademir Toebe‡ and António M. S. S. Andrade§

*Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
Email: henrique.j.h99@gmail.com

†Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
Email: tiagofaistel@yahoo.com.br

‡Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil
Email: ademir.eng.eletrica@gmail.com

§Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, Brasil
Email: antoniom.spencer@gmail.com

Abstract—High step-up DC-DC converters are necessary in photovoltaic energy generation, due the low voltage of the panels source. This article propose the Doubler Output Coupled Inductor converter. This converter is based in boost converter and utilize switched capacitors and a coupled inductor to maximize the static voltage gain. The converter achieve a high voltage gain with low turns ratio in the coupled inductor and an acceptable duty cycle. Can highlight the converter utilize low number of components and have low voltage and current stresses in semiconductors. To validate and evaluate the operation of the converter a 200W prototype is simulated.

Keywords – DC-DC Converter, High step-up, Ressonance

Resumo—Conversores CC-CC de alto ganho de tensão são necessários em sistemas solares de geração de energia, devido a baixa tensão gerada por painéis fotovoltaicos. Este artigo propõe o Conversor Doubler Output Coupled Inductor. Este conversor é baseado no conversor boost e utiliza capacitores chaveados e um indutor acoplado para maximizar o ganho de tensão. O conversor atinge um elevado ganho de tensão com baixa relação de transformação no indutor acoplado e uma razão cíclica mediana. Pode-se destacar que o conversor utiliza um reduzido número de componentes além de baixos esforços de tensão e corrente nos semicondutores do circuito. Com intuito de avaliar e validar o funcionamento do conversor um protótipo de 200W é simulado.

Palavras chave – Alto ganho de tensão, Conversor CC-CC, Ressonância

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos o interesse em energias renováveis, como sistemas fotovoltaicos, tem aumento de interesse entre pesquisadores e industria como alternativa ao uso de combustíveis fósseis [1], [2]. Para prover eletricidade a uma rede elétrica (220V), inicialmente é necessário aumentar a tensão fornecida pelo painel solar (<50V) para a tensão de um barramento (400V). Então pode-se conectar o barramento a

um inversor [3]. Por outro lado, painéis podem ser conectados em série, assim alcançando uma tensão mais elevada. Porém a tensão dos PVs ficam expostas ao efeito de sombreamento com a diminuição da potência fornecida pelo conjunto de painéis solares. [4], [5]

Um microinversor (MIC) consiste em um conversor de alto ganho CC-CC, que eleva a tensão do PV para o barramento CC. O segundo estágio, o inversor CC-CA, deve regular a tensão e realizar o rastreamento do máximo ponto de potência (MPPT) do painel fotovoltaico [6], [7]. Uma das vantagens deste tipo de sistema é a independência da operação de cada modulo, isso é, se cada painel é exposto ao efeito de sombreamento, isso diminui o desempenho do outros painéis. Por outro lado é um grande desafio alcançar um elevado rendimento no estágio de alto ganho de tensão CC-CC. [8], [9]

Como estudado na literatura, o conversor boost não atinge um alto rendimento quando o ganho de tensão é elevado. Isso ocorre porque com o aumento da razão cíclica as perdas dos resistores intrínsecos do conversor aumentam, o que compromete o desempenho do conversor [10], [11]. Uma técnica simples é o indutor acoplado (Fig. 1a) associado com o conversor boost. Junto com estas combinações, pode-se destacar o conversor boost com indutor acoplado em cascata [12], paralelo [13] e empilhado [14]. Em adição também pode se ressaltar o conversor boost com indutor acoplado e multiplicador de tensão [13], e outro. Para garantir boa performance, estes conversores tem como objetivo reduzir a razão cíclica a relação de transformação do indutor acoplado. Com o aumento da relação de transformação do indutor acoplado, a indutância de dispersão aumenta com isso as perdas do interruptor e diodos fica elevada.

Por outro lado uma outra técnica simples que pode ser associada ao conversor boost é um capacitor chaveado (Fig. 1b) de acordo com [14]. Recentemente, muitos conversores baseados no conversor boost e capacitores chaveados foram propostos como: super-lift [15], voltage-lift [16], Dickson

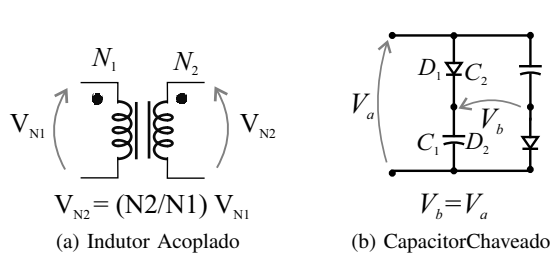


Fig. 1 Técnicas para elevação do ganho de tensão

charge pump [17], capacitor chaveado estendido [18]. Estes conjuntos de conversores tem desvantagens como alto pico de corrente nos interruptores e diodos, o que compromete o rendimento destes conversores.

II. TÉCNICAS DE ALTO GANHO DE TENSÃO EMPREGADAS NO CONVERSOR PROPOSTO

Para se ter um melhor entendimento do do conversor CC-CC de alto ganho de tensão esta seção apresenta duas técnicas empregadas ao conversor *Boost* para que este atinja um alto ganho de tensão.

A. Derivação da topologia

Inicialmente o conversor *Boost* é apresentado em 2a. Este precisa uma razão de chaveamento D muito alta para atingir altos ganhos de tensão. Para maximizar este ganho pode-se associar um indutor acoplado formando o conversor apresentado em 2b. Com isso o ganho de tensão é aumentado porém para atingir um alto ganho estático M é necessário que a relação de transformação do indutor acoplado $N = N_2/N_1$ seja elevado. Um alto N faz com que se tenham muitas voltas no secundário, assim a indutância de dispersão L_k e resistência do secundário são mais elevadas, ocasionando em maiores perdas no conversor. Outra técnica para elevar este ganho de tensão é o uso capacitores chaveados que podem formar um dobrador de tensão, como apresentado em 2c. Para se alcançar um alto ganho de tensão a partir desta técnica podem ser associados diversas células dobradoras de tensão ao circuito como apresentado por [18]. Porém isso faz com que o número de componentes do conversor seja muito elevado.

Então, para resolver estes problemas uma nova topologia, o Conversor DOCI (*Doubler Output Coupled Inductor*) é apresentada em 3, este utiliza um indutor acoplado e uma célula dobradora de tensão, sendo baseado nos conversores apresentados anteriormente. Na próxima seção o funcionamento e esforços de tensão, corrente e projeto de indutância e capacitância do conversor são apresentados.

III. CONVERSOR DOCI

A topologia e etapas de operação do conversor são apresentadas na Fig. 3a considerando a indutância de dispersão (L_k). Nesta seção é apresentado o funcionamento do conversor, esforços de tensão e corrente além do projeto de indutores e capacitância do circuito.

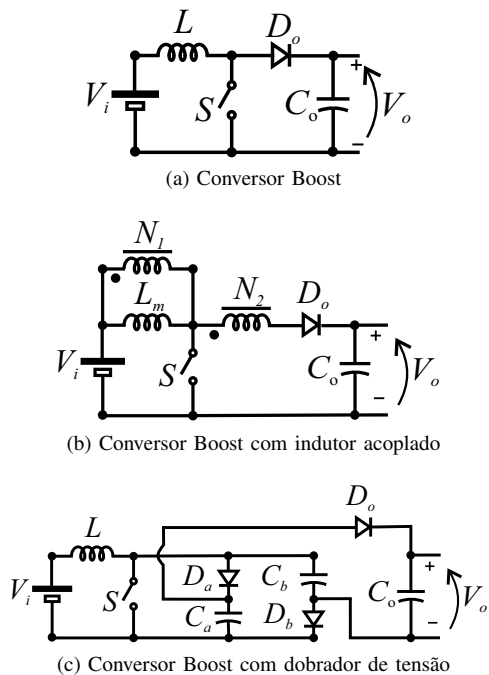


Fig. 2 Conversores CC-CC

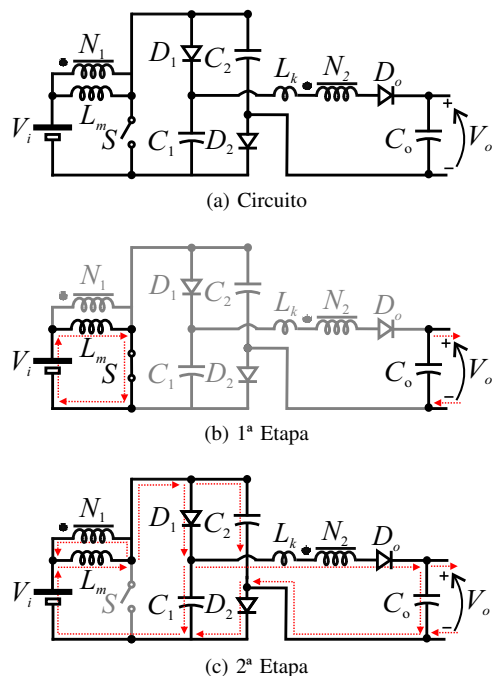


Fig. 3 Conversor DOCI

A. Funcionamento do conversor

No modo de condução contínua (CCM) o conversor tem duas ou três etapas de operação dependendo da capacitância e indutância. O circuito proposto e as etapas de operação são apresentadas na Fig. 3, os componentes em cinza estão desativados e os componentes em preto estão em condução. As formas de onda genéricas nos principais componentes do

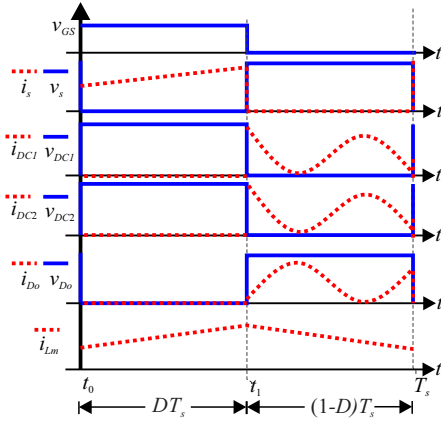


Fig. 4 Formas de onda genéricas do conversor DOCI

conversor são apresentadas em 4 Para analisar o conversor são feitas as seguintes considerações:

- O circuito está operando em MCC(Modo de condução contínua) e em regime permanente;
- Todos semicondutores (S , D_1 , D_2 , D_o) são ideais;
- Os capacitores (C_1 , C_2 e C_o) são grandes suficiente para manterem a tensão constante.
- A relação de transformação do indutor acoplado é dada por $N = N_2/N_1$
- A indutância de dispersão do indutor é representada por L_k

Etapa 1 [$t_0 - t_1$, Figura 3b]: Esta etapa inicia no instante de tempo em que o interruptor S é acionado. A indutância magnetizante é magnetizada pela tensão de entrada V_i . Dessa forma, a corrente de L_m cresce linearmente podendo ser escrita por (1).

$$i_{L_m}(t) = \frac{V_i}{L_m}t + i_{L_m}(t_0) \quad (1)$$

A tensão na indutância de dispersão é aproximadamente nula. Consequentemente a corrente em S é a soma das correntes do primário e secundário do indutor acoplado, como $I_{N_1} = 0$ pode-se escrever i_S como (2).

$$i_S(t) = i_{L_m}(t) \quad (2)$$

Nesta etapa os diodos D_1 , D_2 e D_o estão reversamente polarizados contanto a corrente sobre estes é nula.

Etapa 2 [$t_1 - t_2$ Fig. 3c]- Inicia no momento em que o interruptor S é aberto. O indutor L_m é desmagnetizado pela tensão $V_{L_m} = V_i - V_{C_1}$, logo sua corrente pode ser escrita por (3). Como o interruptor está $I_S = 0$ Os diodos D_1 e D_2 estão conduzindo a corrente dada por (4), enquanto o diodo de saída D_o conduz a corrente (5).

$$i_{L_m}(t) = \frac{V_i - V_{C_1}}{L_m}t + I_{L_m}(t_0) \quad (3)$$

$$i_{D_1} = i_{D_2} = i_{C_1} + I_{L_k} = \frac{I_o}{1-D} \left| \cos\left(\frac{t}{\sqrt{L_k C_{eq}}}\right) \right| \quad (4)$$

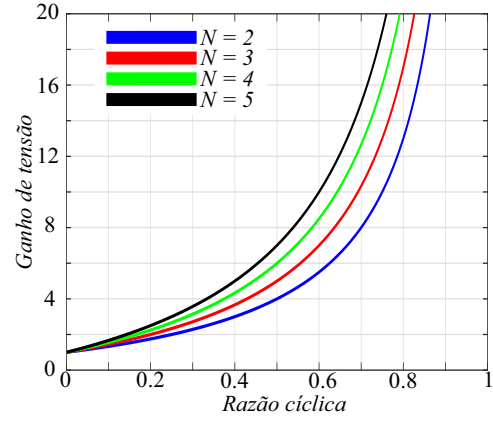


Fig. 5 Ganho de tensão para diversos valores de N

$$i_{D_o} = I_{L_k} = \frac{I_o}{1-D} \left| \text{sen}\left(\frac{t}{\sqrt{L_k C_{eq}}}\right) \right| \quad (5)$$

B. Ganho de tensão

A tensão de saída do conversor pode ser descrita como (6) a partir da análise da segunda etapa de operação do circuito. 3c

$$V_o = V_{C_1} + V_{C_2} + V_{N_2} - V_{N_1} - V_i = V_i \frac{1+ND}{1-D} \quad (6)$$

onde

$$V_{N_1} = \frac{V_i D}{1-D} \quad (7)$$

$$V_{N_2} = NV_{N_1} \quad (8)$$

$$V_{C_1} = V_{C_2} = V_i + V_{N_1} = \frac{V_i}{1-D} \quad (9)$$

dividindo a tensão de saída pela tensão de entrada se tem o ganho de tensão do conversor dado por (10)

$$M = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1+ND}{1-D} \quad (10)$$

O ganho de tensão para $N = 2$, $N = 3$, $N = 4$, $N = 5$ é apresentado na Fig. 5

C. Esforços de tensão

Na primeira etapa de operação S está aberta, o esforço de tensão sobre o interruptor é dado por

$$V_S = V_i + V_{L_m} = \frac{V_i}{1-D} \quad (11)$$

Na segunda etapa de operação os diodos D_1 , D_2 e D_o estão bloqueados, a tensão sobre os terminais destes é dada respectivamente por (12) e (13)

$$V_{D_1} = V_{D_2} = V_{C_1} = \frac{V_i}{1-D} \quad (12)$$

$$V_{D_o} = V_o - V_{C_1} - V_{C_2} + V_{N_2} = V_i \frac{N-1}{1-D} \quad (13)$$

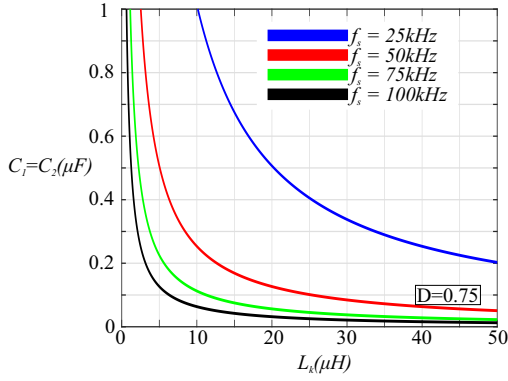


Fig. 6 Valores de C_1 e C_2 de projeto

D. Esforços de corrente

A corrente médias dos diodos D_1 , D_2 D_o , é dada por (14). A corrente eficaz do interruptor é dada por (15).

$$I_{D_o} = I_{D_1} = I_{D_2} = I_o \quad (14)$$

$$I_s = \sqrt{D}I_{L_m} = \sqrt{D}(I_{i_{Md}} + NI_{o_{Md}}) \quad (15)$$

E. Projeto de indutância e capacitância

O valor da indutância magnetizante é projetado a partir de (16)

$$L_m = \frac{DV_i}{\Delta I I_m f_S} \quad (16)$$

A capacitância de saída pode ser calculada por (17) a partir da ondulação de tensão desejada. As capacitâncias C_1 e C_2 são projetadas a partir de (18) para que a tensão nos diodos dos capacitores chaveados seja reduzida no momento em que estes param de conduzir.

$$C_o = \frac{DI_o}{\Delta V_o f_S} \quad (17)$$

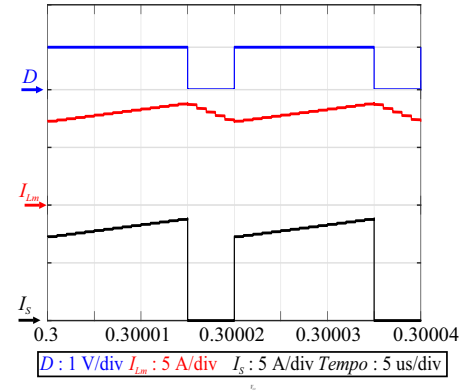
$$C_1 = C_2 = \frac{[(1-D)T_s]^2}{\pi^2 L_k} \quad (18)$$

A Fig. 6 apresenta valores de projeto de C_1 e C_2 para L_k variado de 0 até $50\mu F$ e com frequências de 25kHz, 50kHz, 75kHz e 100kHz. A frequência de oscilação da corrente em C_1 , C_2 , D_1 , D_2 e D_o na segunda etapa de operação do conversor é inversamente proporcional aos valores de C_1 , C_2 e L_k . Ou seja, com o aumento de dos valores de L_k , C_1 e C_2 faz com que a frequência de oscilação de corrente diminua. Para a melhor operação do conversor é interessante que $I_{D_1} = I_{D_2} = 0$ no instante ao fechamento do interruptor S . Como estes valores de corrente são dados por (4), então é desejável que 19 ocorra no momento do fechamento de S .

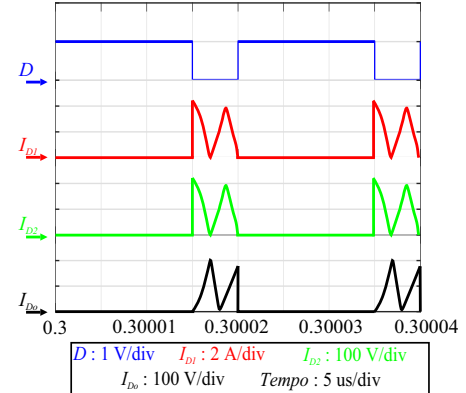
$$\cos\left(\frac{t}{\sqrt{L_k C_{eq}}}\right) = 0 \quad (19)$$

Table I Tabela com dados do conversor protótipo simulado

Sigla	Descrição	Valor
P_i	Potência de entrada	200W
M	Ganho de tensão	13,33
V_i	Tensão de entrada	30V
V_o	Tensão de saída	400V
N	Relação de transformação	3
D	Razão cíclica	0.755
f_S	Frequência de chaveamento	50kHz
L_m	Indutância de magnetização	283 μF
$\Delta I L_m$	Ondulação de corrente	20%
$C_1 e C_2$	Capacitores	440nF
C_o	Capacitor	1 μF
$\Delta I V_{C_o}$	Ondulação de tensão	2%



(a) Corrente da chave S



(b) Corrente nos diodos

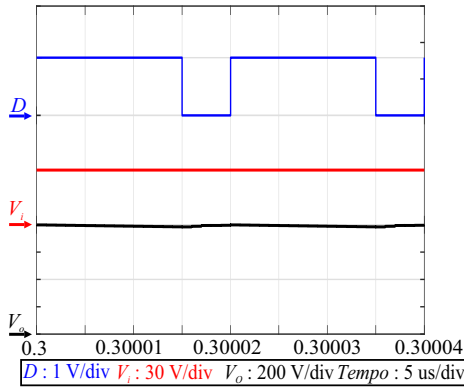
Fig. 7 Formas de onda de corrente do conversor simulado

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO EXPERIMENTAIS

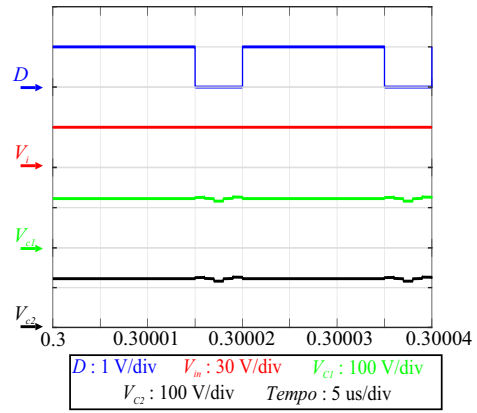
Para verificar o desempenho do conversor DOCI em um sistema fotovoltaico, um protótipo foi simulado. De acordo com as especificações da Tabela I

A Fig. 7 apresentam as correntes em I_{L_m} , I_S , I_{D_1} , I_{D_2} e I_{D_o} . As correntes do circuito simulado apresentam comportamento muito semelhante das correntes esperadas. Com isso, pode-se concluir que o Conversor DOCI opera como esperado.

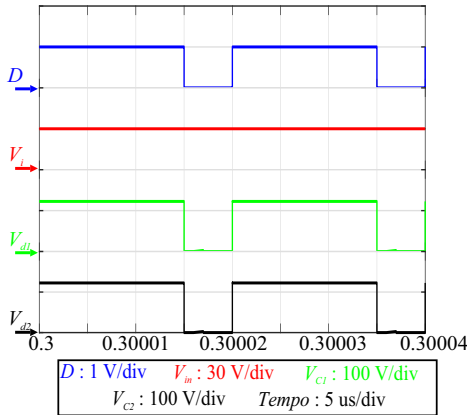
A Fig. 8a demonstra o sinal de controle (D), a tensão



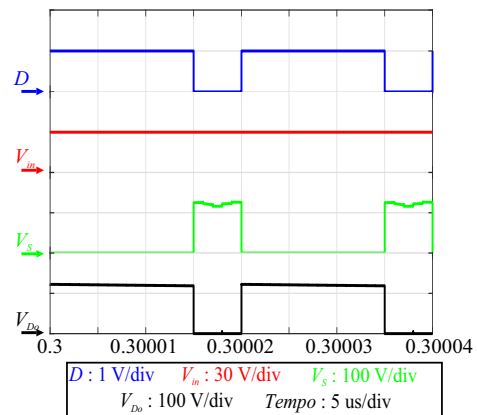
(a) Tensão de entrada e tensão de saída



(b) Tensão nos capacitores C_1 e C_2



(c) Tensão nos diodos D_1 e D_2



(d) Tensão no interruptor S e Diodo D_o

Fig. 8 Formas de onda de tensão do conversor simulado

de entrada ($V_i = 30$), a tensão de saída do conversor proposto ($V_o = 400$). Como pode ser visto, o ganho de tensão $M = 13.33$ é alcançado. A Fig. 8b o sinal de controle, a tensão de entrada ($V_i = 30$), a tensão dos capacitores C_1 e C_2 ($V_{C_1} = V_{C_2} = 125V$). Em relação aos esforços de tensão dos componentes, na Fig. 8c é apresentada a tensão nos diodos dos capacitores chaveados D_1 e D_2 ($V_{D_1} = V_{D_2} = 125V$) além da tensão de entrada e sinal de controle. A Fig. 8d apresenta a tensão do interruptor S ($V_S = 125V$) e tensão do diodo de de saída D_o ($V_{D_o} = 240V$).

A Fig. 9 apresenta o comportamento do ganho de tensão ideal teórico e do ganho de tensão simulado para diferentes valores de razão cíclica. O ganho de tensão ideal é muito próximo do ideal para razões cíclicas abaixo de 0,9.

V. CONCLUSÃO

Este artigo propôs o conversor DOCI. O conversor usa técnicas simples: capacitor chaveado e indutor acoplado, utiliza um reduzido número de componentes para atingir um elevado ganho de tensão, baixa complexidade, somente um interruptor. Apresenta baixos esforços de tensão e corrente. Para avaliar o conversor os resultados de simulação são apresentados. Estes validam a operação e características do conversor.

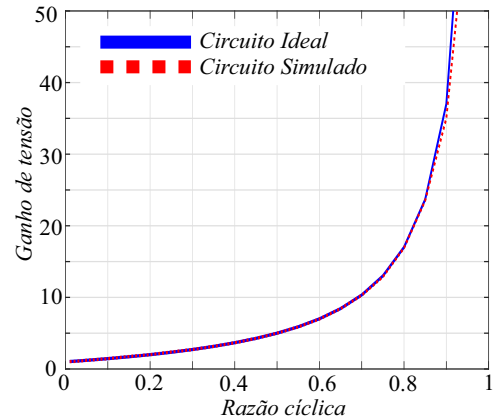


Fig. 9 Ganho do circuito ideal e do circuito simulado

VI. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001

REFERENCES

- [1] M. Forouzes, Y. Shen, K. Yari, Y. P. Siwakoti, and F. Blaabjerg, "High-efficiency high step-up dc-dc converter with dual coupled inductors for grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 7, pp. 5967–5982, 2017.
- [2] K.-C. Tseng, C.-C. Huang, and C.-A. Cheng, "A high step-up converter with voltage-multiplier modules for sustainable energy applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 1100–1108, 2015.
- [3] A. M. S. S. Andrade, L. Schuch, and M. L. da Silva Martins, "High step-up pv module integrated converter for pv energy harvest in freedm systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 2, pp. 1138–1148, 2016.
- [4] D. Vinnikov, A. Chub, E. Liivik, R. Kosenko, and O. Korkh, "Solar optiverter—a novel hybrid approach to the photovoltaic module level power electronics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3869–3880, 2018.
- [5] F. Edwin, W. Xiao, and V. Khadkikar, "Topology review of single phase grid-connected module integrated converters for pv applications," in *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2012, pp. 821–827.
- [6] M. Forouzes, 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," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178, 2017.
- [7] A. M. S. S. Andrade, L. Schuch, and M. L. da Silva Martins, "Analysis and design of high-efficiency hybrid high step-up dc-dc converter for distributed pv generation systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 5, pp. 3860–3868, 2018.
- [8] V. F. Pires, A. Cordeiro, D. Foito, and J. F. Silva, "High step-up dc-dc converter for fuel cell vehicles based on merged quadratic boost-Cuk," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 8, pp. 7521–7530, 2019.
- [9] A. M. S. S. Andrade and M. L. da Silva Martins, "Quadratic-boost with stacked zeta converter for high voltage gain applications," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 4, pp. 1787–1796, 2017.
- [10] Q. Zhao, F. Tao, and F. C. Lee, "A front-end dc/dc converter for network server applications," in *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 01CH37230)*, vol. 3. IEEE, 2001, pp. 1535–1539.
- [11] A. M. S. S. Andrade, E. Mattos, L. Schuch, H. L. Hey, and M. L. da Silva Martins, "Synthesis and comparative analysis of very high step-up dc-dc converters adopting coupled-inductor and voltage multiplier cells," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 7, pp. 5880–5897, 2017.
- [12] T. Nouri, N. Vosoughi, S. H. Hosseini, E. Babaei, and M. Sabahi, "An interleaved high step-up converter with coupled inductor and built-in transformer voltage multiplier cell techniques," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 3, pp. 1894–1905, 2018.
- [13] H. Liu, H. Hu, H. Wu, Y. Xing, and I. Batarseh, "Overview of high-step-up coupled-inductor boost converters," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 2, pp. 689–704, 2016.
- [14] K. Li, Y. Hu, and A. Ioinovici, "Generation of the large dc gain step-up nonisolated converters in conjunction with renewable energy sources starting from a proposed geometric structure," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 32, no. 7, pp. 5323–5340, 2016.
- [15] F. L. Luo and H. Ye, "Super-lift boost converters," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 7, pp. 1655–1664, 2014.
- [16] F. M. Shahir, E. Babaei, and M. Farsadi, "Analysis and design of voltage-lift technique-based non-isolated boost dc-dc converter," *IET Power Electronics*, vol. 11, no. 6, pp. 1083–1091, 2017.
- [17] B. P. Baddipadiga and M. Ferdowsi, "A high-voltage-gain dc-dc converter based on modified dickson charge pump voltage multiplier," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 10, pp. 7707–7715, 2016.
- [18] A. Amir, H. S. Che, A. Amir, A. El Khateb, and N. Abd Rahim, "Transformerless high gain boost and buck-boost dc-dc converters based on extendable switched capacitor (sc) cell for stand-alone photovoltaic system," *Solar Energy*, vol. 171, pp. 212–222, 2018.