Conversor CC-CC ZETA com Amplo Ganho de Tensão para Aplicação em Microrredes

Vitória Júlia Aguiar Liberato **René Pastor Torrico Bascopé**
Dalton de Araújo Honório
Departamento de Engenharia Elétrica - UFC, (e-mail: vitoriajuliaaguiar@alu.ufc.br; rene@dee.ufc.br; dalton@dee.ufc.br)

Abstract: This paper presents a generic and particular topology of the ZETA wide voltage gain (WVG) DC-DC converter based on Three-State Switching Cell (TSSC), which can be used in microgrid applications with renewable energies. To achieve the wide high voltage in the ZETA converter with TSSC, isolated secondary windings have been added to the transformer and its terminals connected to voltage doubler Rectifiers and they capacitors connected in series. The addition of cascaded Rectifiers reduces the voltage across the switches, allowing the use of low-resistance MOSFETs ($R_{DS_{on}}$), thus improving the efficiency of the converter. To check the principle of operation, qualitative analysis, quantitative analysis, design procedure and simulation results for the output power specifications of $P_o = 1kW$, input voltage of $V_i = 48V$ and output voltage of $V_o = 400V$ are presented.

Resumo: Este artigo apresenta uma topologia genérica e particular do conversor CC-CC ZETA de amplo ganho de tensão (AGT) baseado em Célula de Comutação de Três Estados (CCTE), o qual pode ser usado em aplicações de microrredes com energias renováveis. Para alcançar o amplo ganho de alta tensão no conversor ZETA com CCTE, enrolamentos secundários isolados foram adicionados ao transformador e seus terminais conectados a retificadores dobradores de tensão e seus capacitores conectados em série. A adição de retificadores em série reduz a tensão sobre os interruptores, permitindo o uso de MOSFETs de baixa resistência de condução ($R_{DS_{on}}$), melhorando assim o rendimento do conversor. Para verificar o princípio de operação, análise qualitativa, análise quantitativa, procedimento de projeto e resultados de simulação para as especificações de potência de saída de $P_o = 1kW$, tensão de entrada de $V_i = 48V$ e tensão de saída de $V_o = 400V$ são apresentados.

Keywords: DC-DC Converter; Wide Voltage Gain (WVG); Three Stage Switching Cell (TSSC).
Palavras-chaves: Conversor CC-CC; Amplo Ganho de Tensão (AGT); Célula de Comutação de Três Estágios (CCTE).

1. INTRODUÇÃO

O uso de conversores CC não isolados é essencial em várias aplicações onde as tensões das fontes de alimentação vão de 12 Vcc a 144 Vcc. Autores como Hart (2016) e Rashid (2014) destacam sua importância na conversão eficiente de energia elétrica, desde fontes de alimentação chaveadas à sistemas com energias renováveis. A topologia Zeta, assim como qualquer outro conversor CC-CC não isolado tem potencial para aplicações em microrredes. Os conversores de amplo ganho de tensão são cruciais em sistemas de energia, para elevar tensões nos barramentos de baixa tensão presentes em baterias, células combustíveis, módulos fotovoltaicos e aerogeradores eólicos de pequeno porte. O alto rendimento é importante em sistemas que processam energia elétrica, daí, que esse fator sempre deve ser ponderado Costa (2022).

Com base na tese de doutorado Bascopé et al. (2001) e Bascopé and Barbi (2000), foi criada a célula de comutação três estados (CCTE) a partir do conversor CC-CC Push-Pull alimentado em corrente, onde é explorado no trabalho de Balestero (2006). Nos trabalhos Araújo et al. (2009), de Sousa et al. (2015) e Silva (2023) está presente o uso da célula, já para o amplo ganho de tensão, é apresento uma topologia generalizada com adição de secundários, conforme proposto em Torrico-Bascopé et al. (2006), a qual trás o grande diferencial que a tensão nas chaves controladas é menor. É crescente a procura por conversores com amplo ganho de tensão, desta maneira, nesse artigo é estudado o conversor CC-CC Zeta AGT-CCTE, onde o ciclo de trabalho tem que ser maior do que $0,4$ por conta da transferência de energia entre os enrolamentos e a saída.

O conversor proposto em Santosh Kumar Reddy et al. (2022) oferece um amplo ganho de tensão com um ciclo de trabalho reduzido em comparação com os conversores tradicionais buck-boost, SEPIC, Cúk e Zeta. Ele apresenta uma topologia diferente da tradicional, onde o rendimento fica acima de 90%. Já na topologia proposta em Kushwaha et al. (2020) apresenta um Zeta clássico com correção de fator de potência para carregador de bateria de veículo elétrico, para isso ele trabalha juntamente com um conversor flyback no seu segundo estágio e na entrada são usados dois diodos e dois interruptores, resultando em menos perdas na comutação. Ele tem rendimento médio de $92,05\%$ em plena

carga quando comparado com o conversor convencional. Ou seja, realmente foi uma mudança de grande destaque em relação ao trabalho de Kushwaha and Singh (2019).

No trabalho Arfin et al. (2019) é possível ver uma nova topologia de conversor hibrido modificado a partir do Zeta clássico usando a combinação de indutor e capacitor na estrutura, assim, ele apresenta um amplo ganho de tensão com reduzidas perdas de condução e sem adicionar interruptor. Este conversor fornece tensão de saída contínua proporcionando um aumento de corrente e tensão de até 35 vezes. Isso o torna ideal para situações com exigência de amplo ganho de tensão para aplicações em sistemas com energias renováveis. Os resultados mostram que para uma potência de saída de 250 W o rendimento é acima de 98%.

Além disso, fica evidente que os conversores CC-CC desempenham um papel fundamental nas microrredes, especialmente com fontes de energias renováveis, impactando diretamente no comportamento dinâmico. Segundo San et al. (2020) é indispensável compreender a análise abrangente e sistemática da estabilidade em situações de grande perturbações das microrredes.

2. CONVERSOR PROPOSTO

2.1 Topologias Genérica e Particular

O conversor CC-CC Zeta AGT-CCTE está em sua forma genérica e particular nas Figuras 1 (a) e 1 (b), respectivamente. As principais vantagens deste circuito são: os indutores L_1 e L_2 operam com o dobro da frequência de comutação, permitindo redução de peso e volume; a corrente de entrada que circula pelo indutor L_1 é dividida entre os interruptores S_1 e S_2, reduzindo as perdas de condução.

A topologia particular mostrada na Figura 1 (b) é composta por: fonte de tensão de entrada V_i; interruptores controlados S_1 e S_2; diodos retificadores D_1-D_4; transformador de alta frequência Tr com três enrolamentos T_1, T_2 e T_3; indutores de armazenamento L_1 e L_2; capacitor de transferência C_1; capacitores de filme C_2-C_4; capacitor grampeador de tensão nos semicondutores Cc; capacitor de filtro de barramento C_o e o resistor de carga equivalente Ro. O capacitor C_1 também é de filme e deve ser do tipo (poliéster ou polipropileno), que apresenta uma baixa resistência série-equivalente (R_{se}) e perdas reduzidas. O capacitor Cc tem as mesmas características de C_1 e sua função é grampear a tensão sobre os semicondutores.

2.2 Análise Qualitativa

Para realizar a análise qualitativa do conversor, são feitas as seguintes considerações: operação em regime permanente, operação em modo de condução contínua (MCC), ciclo de trabalho maior que 0,5, corrente de magnetização do transformador nula e semicondutores ideais. Os estágios de operação para um período de comutação e suas formas de onda correspondentes são mostrados nas Figuras 2 e 3, onde T é o período de comutação dos interruptores controlados.

Primeira etapa ($t_0 < t < t_1$)
Inicialmente, o interruptor S_1 entra em condução e S_2

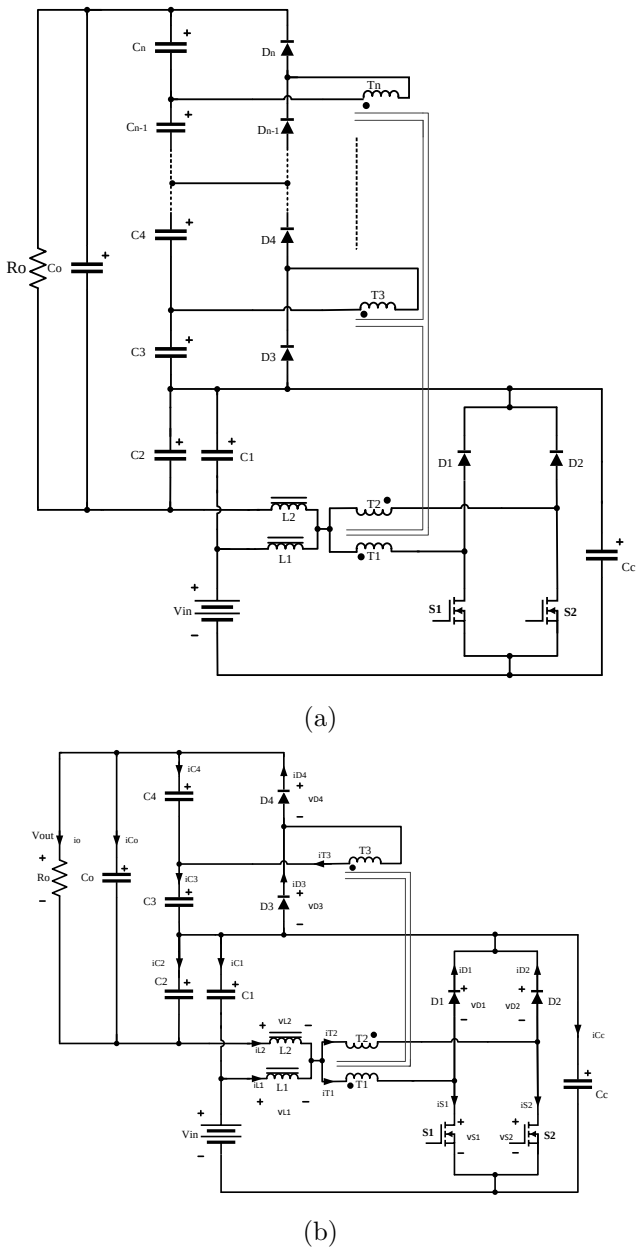
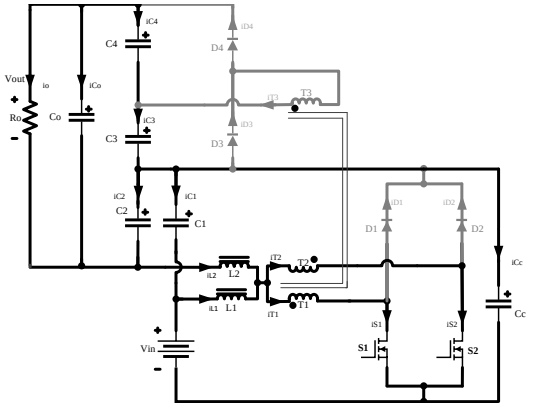


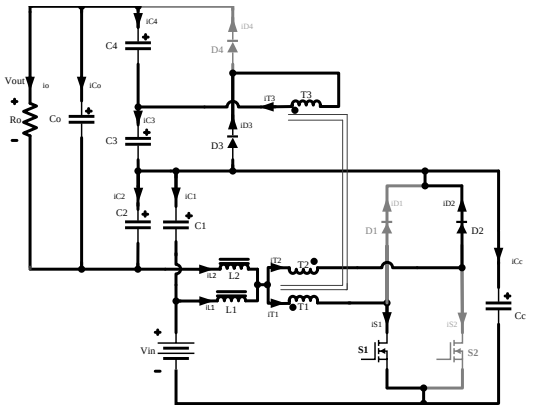
Figura 1. Conversor CC-CC Zeta de alto ganho baseado na TSSC: (a) topologia genérica; (b) topologia particular.

permanece conduzindo. Os diodos D_1, D_2, D_3 e D_4 ficam reversamente polarizados. A corrente que flui em L_1 é igual à corrente média de entrada I_i, e em L_2 é a corrente média de saída I_o. Ao analisar a topologia fica claro que a soma da corrente de entrada e de saída entram na célula de comutação de três estados. Uma parte flui através de T_1 e S_1 (I_{T1}= I_{S1}) e outra parte flui através de T_2 e S_2 (I_{T2}= I_{S2}). Se T_1 e T_2 têm o mesmo número de espiras, as correntes que circulam através deles são iguais (I_{T_1}= I_{T_2}).

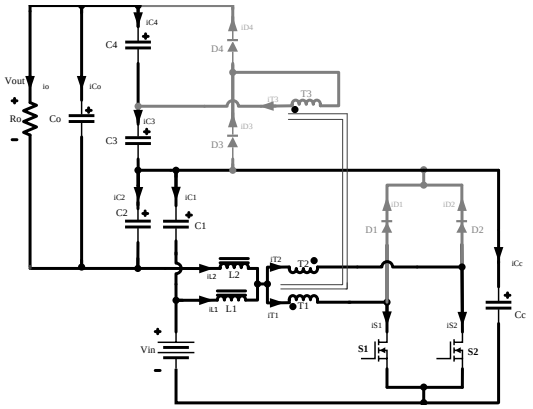
Conforme a polaridade apresentada na Figura 2(a), é gerado um fluxo magnético nulo através do núcleo, dessa maneira não há indução tensão no T_3 e sua corrente é nula. Portanto, pela Lei de Ampére, ocorre um curto circuito magnético, tornando nula a tensão sobre os enrolamentos. Além disso, as correntes nos indutores crescem linearmente



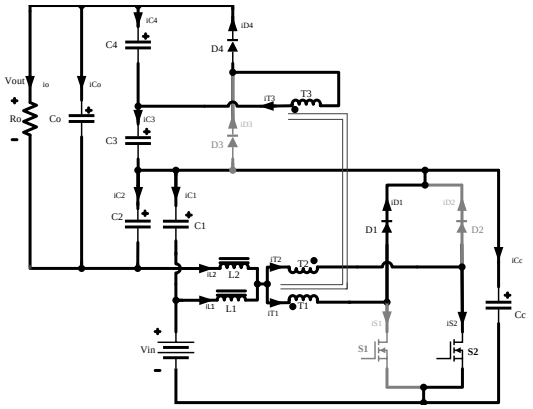
(a) Primeira etapa



(b) Segunda etapa



(c) Terceira etapa



(d) Quarta etapa

Figura 2. Etapas de operação em MCC.

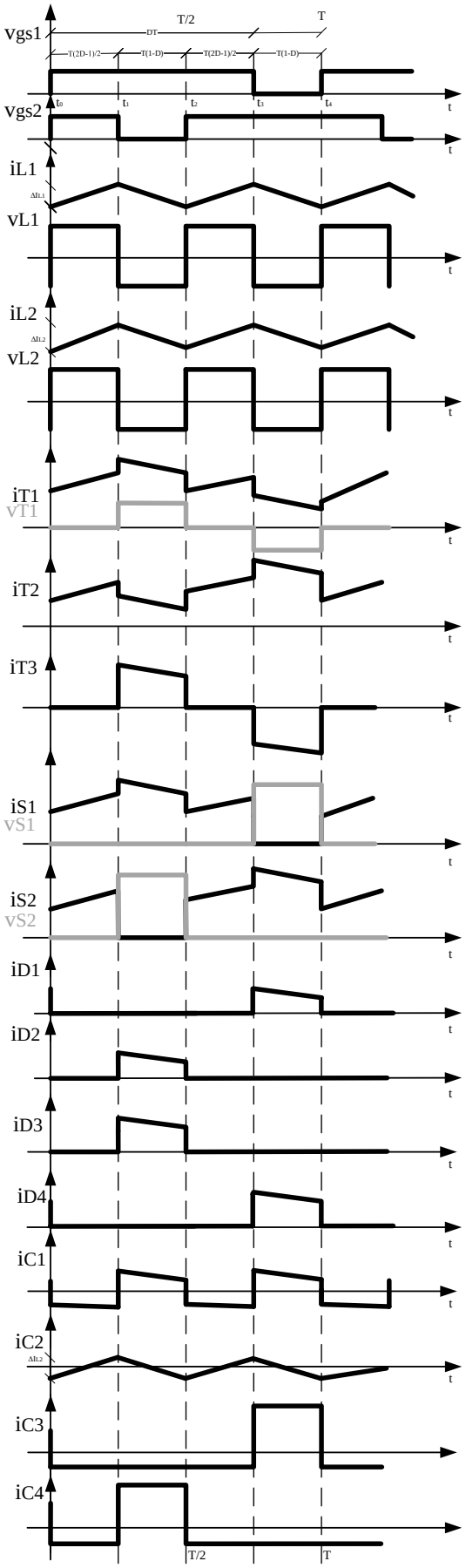


Figura 3. Formas de onda do zeta em MCC.

e ocorre armazenamento de energia. Já o capacitor C_1 está fornecendo energia para o indutor L_2 e os capacitores C_2, C_3 e C_4 estão fornecendo energia à carga. Esta etapa termina quando S_2 é bloqueado.
As equações diferenciais correspondentes durante esta etapa são dadas por (1) e (2).

$$L_1 \cdot \left(\frac{d}{dt} i_{L_1}\right) - V_i = 0 \tag{1}$$

$$L_2 \cdot \left(\frac{d}{dt} i_{L_2}\right) + V_{C_2} - V_{C_c} = 0 \tag{2}$$

Segunda etapa ($t_1 < t < t_2$)
O interruptor S_2 está bloqueado e S_1 permanece conduzindo. Devido à inversão da derivada de corrente a tensão sobre o indutor é invertida. Os diodos D_2 e D_3 são polarizados diretamente, enquanto D_1 e D_4 permanecem polarizados reversamente. Da mesma forma da etapa anterior a soma da corrente de entrada e de saída flui através de T_2 e D_2 ($I_{T_2} = I_{D_2}$) e através de T_1 e S_1 (I_{T1}= I_{S1}) até a carga. Além disso, esta corrente decresce linearmente, transferindo a energia armazenada na etapa anterior e a energia da fonte de entrada para a carga e para os capacitores C_2, C_3, C_4 e Co. Se T_1 e T_2 têm o mesmo número de espiras, pelo efeito magnético, as correntes que circulam através deles são iguais ($I_{T_1} = I_{T_2}$) e a corrente em T_3 obedece a relação de transformação na equação (3). Esta etapa está ilustrada na Figura 2(b). Finaliza quando o interruptor S_2 é comandado a conduzir.
As equações diferenciais correspondentes durante esta fase são dadas por (4) e (5).

$$I_{T_3} = \frac{I_{T_1}}{a} \tag{3}$$

$$L_1 \cdot \left(\frac{d}{dt} i_{L_1}\right) - \frac{V_{C_c}}{2} + V_i = 0 \tag{4}$$

$$L_2 \cdot \left(\frac{d}{dt} i_{L_2}\right) + \frac{V_{C_c}}{2} + V_{C_2} = 0 \tag{5}$$

Terceira etapa ($t_2 < t < t_3$)
Esta etapa é similar à primeira com a diferença de que o interruptor S_2 entra em condução enquanto que S_1 permanece conduzindo. Os diodos D_1, D_2, D_3 e D_4 ficam polarizados reversamente. A Figura 2(c) ilustra esta etapa.

Quarta etapa ($t_3 < t < t_4$)
Esta etapa é semelhante à segunda, com a diferença de que o interruptor S_1 é bloqueado e S_2 permanece em condução. Os diodos D_1 e D_4 são polarizados diretamente, enquanto D_2 e D_3 permanecem polarizados reversamente. A corrente que circula através do circuito está ilustrada na Figura 2(d).

2.3 Ganho Estático em MCC

A seguir é apresentado o ganho estático do conversor proposto, isto é, a relação entre a tensão total de saída e a tensão total de entrada em função do ciclo de trabalho e a relação de transformação do transformador a. A tensão de saída total é dada pela soma das tensões nos capacitores C_2, C_3 e C_4, dada pela equação (6):

$$V_o = V_{C_2} + V_{C_3} + V_{C_4} = V_{C_2} + 2 \cdot V_{C_3} \tag{6}$$

$$V_{C_2} = V_i \cdot \frac{D}{(1-D)} \tag{7}$$

$$V_{C_c} = V_{C_2} + V_i \tag{8}$$

$$V_{T_1} = \frac{V_{C_c}}{2}$$

$$V_{T_3} = a \cdot V_{T_1} = a \cdot \frac{V_{C_c}}{2} = V_{C_3} = V_{C_4}$$

Substituindo, tem-se:

$$\begin{aligned} V_o &= V_i \cdot \frac{D}{(1-D)} + 2 \cdot a \cdot \frac{V_{C_c}}{2} \\ &= V_i \left(\frac{D+a}{1-D}\right) \end{aligned} \tag{9}$$

Dessa maneira o ganho estático é dado pela equação (10). As curvas correspondentes a ela, tomando como parâmetro a relação de transformação a, são mostradas na Figura 4. Onde $a = 0$ significa que não há enrolamentos secundários, ou seja, corresponde à curva do Zeta clássico..

$$\frac{V_o}{V_i} = \left(\frac{D+a}{1-D}\right) \tag{10}$$

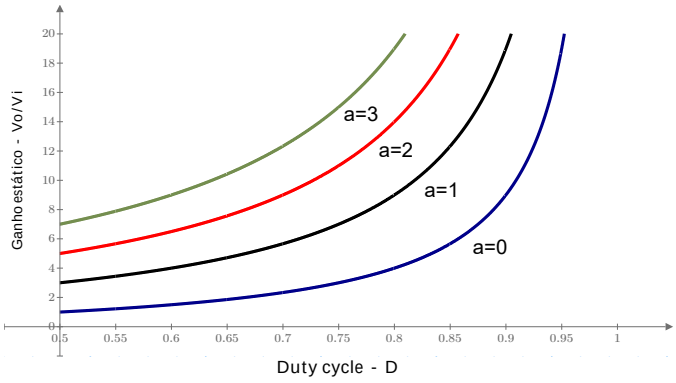


Figura 4. Curvas do ganho estático do conversor proposto em MCC.

3. ANÁLISE TEÓRICA

A seguir, considerando em MCC e um ciclo de trabalho maior que $0,5$ é apresentado os projetos de cada componente do conversor proposto.

3.1 Indutores

A partir das equações (1) e (2), além disso observando a Figura 3, fica claro que o valor de indutância para uma ondulação de corrente nos indutores são dadas pelas equações (11) e (12):

$$L_1 = \frac{V_i \cdot T(2D-1)}{2 \cdot \Delta I_{L_1}} \tag{11}$$

$$L_2 = \frac{V_i \cdot T(2D-1)}{2 \cdot \Delta I_{L_2}} \tag{12}$$

3.2 Capacitores

Durante a primeira etapa de operação o capacitor C_1 fornece energia para o indutor L_2 e para a saída, ou seja,

a corrente que circula através dele é a corrente de saída, como mostra a Figura 2(a). O capacitor C_c mantém a tensão nos semicondutores grampeada e sua capacitância pode ser considerada menor ou igual a do capacitor C_1. Partindo da variação de carga do capacitor tem se a equação (13):

$$C_1 = C_c = \frac{I_o \cdot T(2D-1)}{2 \cdot \Delta V_{C_1}} \tag{13}$$

Para os capacitores C_2, C_3, C_4 e C_o as capacitâncias são encontradas a partir da variação da corrente em um determinado intervalo de tempo conforme a Figura 3.

$$C_2 = \frac{T(2D-1)\Delta I_{L_2}}{4 \cdot \Delta V_{C_2}} \tag{14}$$

$$C_3 = C_4 = \frac{I_o \cdot D \cdot T}{\Delta V_{C_3}} \tag{15}$$

$$C_o = \frac{\Delta I_{L_2} T(1-D)}{4 \cdot \Delta V_{C_2}} \tag{16}$$

3.3 Semicondutores

A tensão máxima e a corrente eficaz nos interruptores de potência S_1 e S_2:

$$V_{S_{max}} \geq (V_i + V_{C_2}) \tag{17}$$

$$I_{S_{ef}} = \frac{(I_i + I_o)}{2} \cdot \sqrt{D} \tag{18}$$

A tensão reversa e corrente média nos diodos D_1 e D_2:

$$V_{D_{reversa}} \geq V_i + V_{C_2} \tag{19}$$

$$I_{D_{md}} = \frac{(I_i + I_o)}{2} \cdot (1-D) \tag{20}$$

A tensão reversa e corrente média nos diodos D_3 e D_4:

$$V_{D_{reversa}} \geq a \cdot (V_i + V_{C_2}) \tag{21}$$

$$I_{D_{md}} = \frac{(I_i + I_o)}{2 \cdot a} \cdot (1-D) \tag{22}$$

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os principais componentes foram projetados usando as especificações da Tabela 1, validando as análises desenvolvidas e verificando o desempenho do conversor proposto. Na Figura 5 está o circuito de simulação feito no *PSIM*.

Tabela 1. Especificações

P_o= 1 kW : Potência de saída
V_i= 48 V : Tensão de entrada
V_o= 400 V: Tensão de saída
f_s= 30 kHz: Frequência de chaveamento

A Figura 6 mostra a tensão porta-fonte das chaves S_1 e S_2, e a corrente e tensão no indutor L_1. Já na Figura 7 está ilustrada a tensão e corrente no indutor L_2 e diodo D_1, que se replica para o diodo D_2 mudando apenas a etapa que ele conduz. A tensão e corrente dos capacitores C_1 e C_2 estão na Figura 8, já para C_3 e C_4 na Figura 11. A tensão e corrente na chave S_1 é a mesma que para a chave S_2 mudando apenas os instantes de condução, o mesmo acontece para os diodos D_3 e D_4, e para o primário e secundário do transformador, conforme está nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

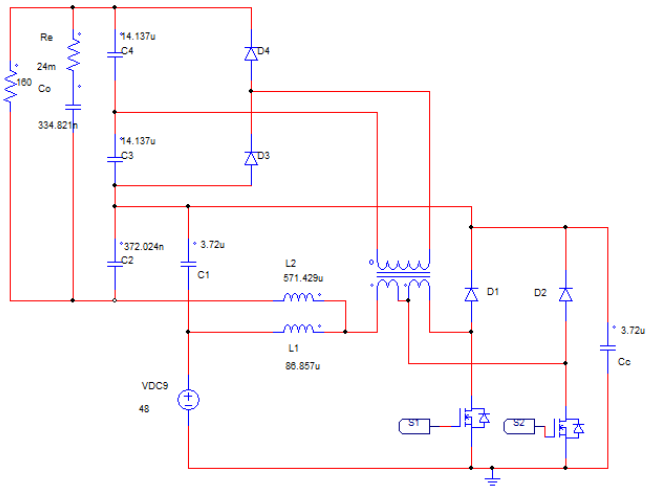


Figura 5. Circuito de simulação.

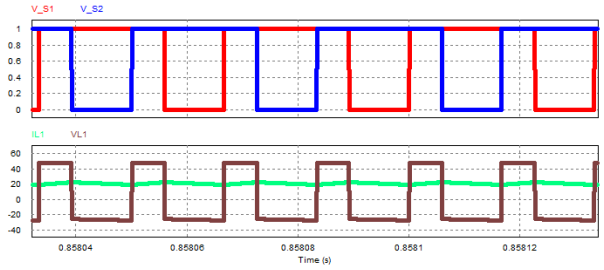


Figura 6. Tensão de controle porta-fonte na chaves S_1 e S_2 e corrente e tensão no indutor L_1.

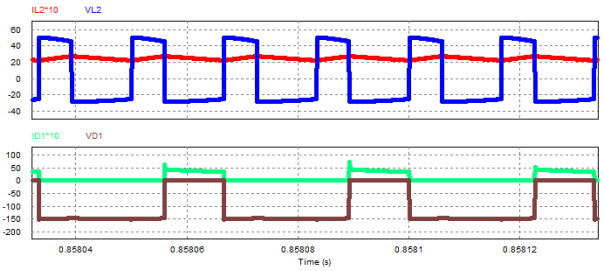


Figura 7. Tensão e corrente no indutor L_2 e no diodo D_1.

É importante destacar que a indutância de dispersão do transformador no conversor proposto apresenta uma influência considerável nos formatos das formas de onda, tornando mais arredondados em relação as formas de onda obtidas com modelo simplificado mostradas na Figura 3. A indutância de dispersão dentro de valores aceitáveis é favorável na comutação dos semicondutores. Na construção do transformador é recomendado manter simétricos os enrolamentos para conseguir as indutâncias de dispersão com valor similares entre os enrolamentos, pois esta condição ajuda na distribuição balanceada de corrente em todos os circuitos.

5. CONCLUSÃO

O artigo apresenta a análise do conversor CC-CC Zeta AGT-CCTE para aplicações em microrredes. Após o projeto dos componentes usando as equações apresentadas,

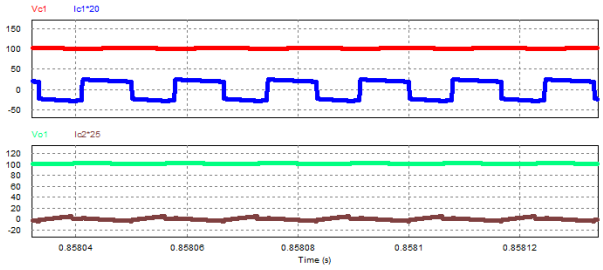


Figura 8. Tensão e corrente nos capacitores C_1 e C_2.

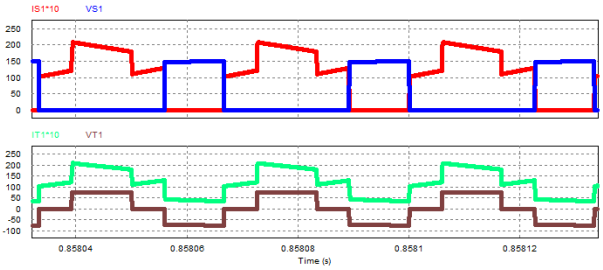


Figura 9. Tensão e corrente na chave S_1 e no transformador T_1.

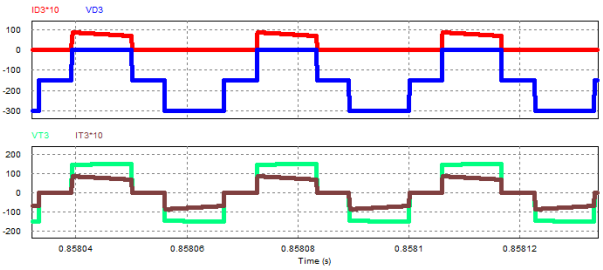


Figura 10. Tensão e corrente no diodo D_3 e no transformador T_3.

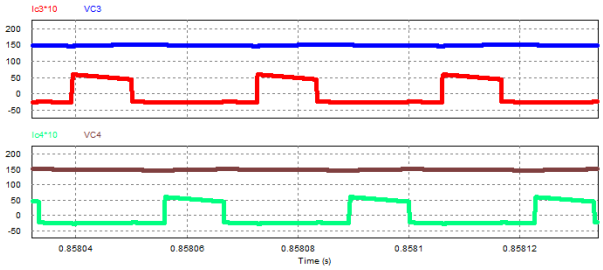


Figura 11. Tensão e corrente nos capacitores C_3 e C_4.

o circuito foi simulado e os resultados confirmaram o princípio de funcionamento com bastante precisão. Na versão final do artigo serão incluídos mais detalhes sobre o conversor proposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos órgãos de fomento à pesquisa CAPES, CNPq e FUNCAP, pelo fornecimento de bolsas aos estudantes de graduação e pós-graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da UFC. Além disso ao Laboratório de Condicionadores de Energia.

REFERÊNCIAS

Araújo, S.V., Torrico-Bascopé, R.P., and Torrico-Bascopé, G.V. (2009). Highly efficient high step-up converter for fuel-cell power processing based on three-state commutation cell. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(6), 1987–1997.

Arfin, S., Al Mamun, A., Chowdhury, T., and Sarowar, G. (2019). Zeta based hybrid dc-dc converter using switched inductor and switched capacitor combined structure for high gain applications. In *2019 IEEE International Conference on Power, Electrical, and Electronics and Industrial Applications (PEEIACON)*, 1–4. IEEE.

Balestero, J.P.R. (2006). Conversor buck utilizando célula de comutação de três estados.

Bascopé, G.V.T. et al. (2001). Nova família de conversores cc-cc pwm não isolados utilizando células de comutação de três estados. *Tese de Doutorado - UFSC*.

Bascopé, G.T. and Barbi, I. (2000). Generation of a family of non-isolated dc-dc pwm converters using new three-state switching cells. In *2000 IEEE 31st annual power electronics specialists conference. Conference proceedings (Cat. No. 00CH37018)*, volume 2, 858–863. IEEE.

Costa, C.G.F.A. (2022). Estudo de topologias e tecnologias de conversores ca/cc para elevação da eficiência energética da interface entre microrredes e a rede elétrica.

de Sousa, J.M., Bastos, G.H.A., Torrico-Bascopé, R.P., and Cruz, C.M. (2015). High voltage gain buck-boost dc-dc converter based on three-state switching cell. In *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, 1–6. IEEE.

Hart, D.W. (2016). *Eletrônica de potência: análise e projetos de circuitos*. McGraw Hill Brasil.

Kushwaha, R. and Singh, B. (2019). Upf-isolated zeta converter-based battery charger for electric vehicle. *IET Electrical Systems in Transportation*, 9(3), 103–112.

Kushwaha, R., Singh, B., and Khadkikar, V. (2020). An improved pq zeta converter with reduced switch voltage stress for electric vehicle battery charger. In *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 858–863. IEEE.

Rashid, M.H. (2014). Eletrônica de potência: dispositivos, circuitos e aplicações. *Tradução de L. Abramowicz*, 48, 48.

San, G., Zhang, W., Guo, X., Hua, C., Xin, H., and Blaabjerg, F. (2020). Large-disturbance stability for power-converter-dominated microgrid: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109859.

Santosh Kumar Reddy, P.L., Obulesu, Y.P., Singirikonda, S., Al Harthi, M., Alzaidi, M.S., and Ghoneim, S.S. (2022). A non-isolated hybrid zeta converter with a high voltage gain and reduced size of components. *Electronics*, 11(3), 483.

Silva, P.H.A.d. (2023). Conversores cc-cc modulares para desenvolvimento de carregadores de baterias off-board para veículos elétricos.

Torrico-Bascopé, G.V., Torrico-Bascopé, R.P., Oliveira, D.S., Antunes, F.L., Araújo, S.V., and Branco, C.G. (2006). A generalized high voltage gain boost converter based on three-state switching cell. In *IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 1927–1932. IEEE.