

CONVERSOR BIDIRECIONAL COM TRÊS PORTAS APLICADO EM SISTEMAS AUTÔNOMOS E FOTOVOLTAICOS COM INTEGRAÇÃO A REDE ELÉTRICA c.c.

Antonio Neilton da Silva – aneiltons1@gmail.com

Luan Carlos dos Santos Mazza – luanmazza@ifce.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento da Indústria

Deivid Matias de Freitas – deivid_ce@hotmail.com

Fernando Luiz Marcelo Antunes - fantunes@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. O presente artigo realiza um estudo sobre o conversor c.c.-c.c. bidirecional Dual Active Bridge com Célula de Comutação de Três Estados para aplicação em sistemas fotovoltaicos e banco de baterias. Sendo mostrado o sistema proposto para aplicação, o princípio de funcionamento do conversor, a sua capacidade de carregar e descarregar um banco de baterias juntamente com uma associação de painéis fotovoltaicos, e outras características. Esse banco de baterias tem tensão nominal de 48 V, são usados 4 painéis fotovoltaicos com tensão de 31 V cada e potência nominal total de 1,06 kW, alimentando um barramento c.c. de 311 V com potência nominal de 2 kW. O controle do fluxo de potência e da tensão na saída pode ser obtido por duas variáveis, o deslocamento de fase (phase-shift - ϕ) entre as tensões fundamentais das duas pontes e o ciclo de trabalho (D) dos interruptores de potência. São mostrados os resultados de resposta dinâmica para o conversor operando com uma razão cíclica maior que 0,5 em regime de carga e descarga do banco de baterias, sendo esse último simulado com uma carga resistiva. É possível observar sua capacidade natural de se comportar como fonte de corrente no barramento c.c. e nos painéis fotovoltaicos.

Palavras-chave: banco de baterias, bidirecional, dual active bridge, sistemas fotovoltaicos, phase-shift.

1. INTRODUÇÃO

Devido a necessidade de sistemas cada vez mais inteligentes para o processamento da potência elétrica, devido questões ambientais e o grande crescimento nas últimas décadas das fontes de energia limpas, surge a necessidade de um estudo cada vez mais aprofundado em sistemas de energia que possam ao mesmo tempo trabalhar com a máxima eficiência elétrica e com fontes de energia limpas. Uma característica dessas fontes de energia é a necessidade do armazenamento da energia gerada, em baterias, como por exemplo a energia gerada por painéis fotovoltaicos. Pelo fato de se armazenar energia em baterias é necessário que o sistema de potência trabalhe com corrente contínua c.c.. Para atender essa finalidade, os conversores de potência c.c.-c.c. são bastante utilizados, em especial os conversores bidirecionais do tipo DAB (*Dual Active Bridge*).

O conversor bidirecional DAB possui características bastante interessantes e de grande utilidade para justificar seu uso e sua importância tais como: o aumento da energia processada e a redução de esforços de tensão e corrente nos interruptores (Mazza, 2014), possui fluxo de potência bidirecional entre sistemas de armazenamento de energia e sistemas de potência c.c. (Duarte et al., 2007), é muito utilizado em sistemas de distribuição de energia elétrica em c.c. (Kim et al., 2009).

Na atualidade, diversas topologias de conversores bidirecionais c.c.-c.c. estão sendo estudadas e encontradas na literatura, como por exemplo topologias para sistemas fotovoltaicos (Pražica, 2011).

O conversor proposto neste trabalho é um conversor bidirecional DAB baseado na célula de comutação de três estados (CCTE) com três portas. Este conversor pode ser utilizado em sistemas fotovoltaicos que irão atuar em residências por exemplo (sistemas autônomos), podendo atuar junto com um banco de baterias, cargas c.c. ou inversores para equipamentos c.a..

O artigo presente, tem como objetivos: mostrar uma topologia de conversor bidirecional nova e bastante utilizada, apresentar algumas estratégias de modulação aplicadas a esse conversor, fazer simulações do conversor proposto funcionando com um painel fotovoltaico ligado em uma de suas portas.

2. SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto é mostrado na Fig. 1. O sistema possui painéis fotovoltaicos ligados a conversores c.c.-c.c. responsáveis pelo MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Todos estes são interligados a um barramento c.c. comum de 311 V. Neste barramento é conectado cargas c.c. e um conversor c.c.-c.c. bidirecional para interconectar o sistema à rede elétrica.

É necessário manter o barramento c.c. com valor médio de tensão em 311V e realizar o fluxo bidirecional de potência. Para realizar tais ações propõe-se uma topologia de conversor c.c.-c.c. inovadora neste artigo. Esse conversor

apresenta características de DAB e a presença da célula de comutação de três estados. Na próxima seção será apresentada a topologia do novo conversor proposto para realizar a função de controlador bidirecional de carga.

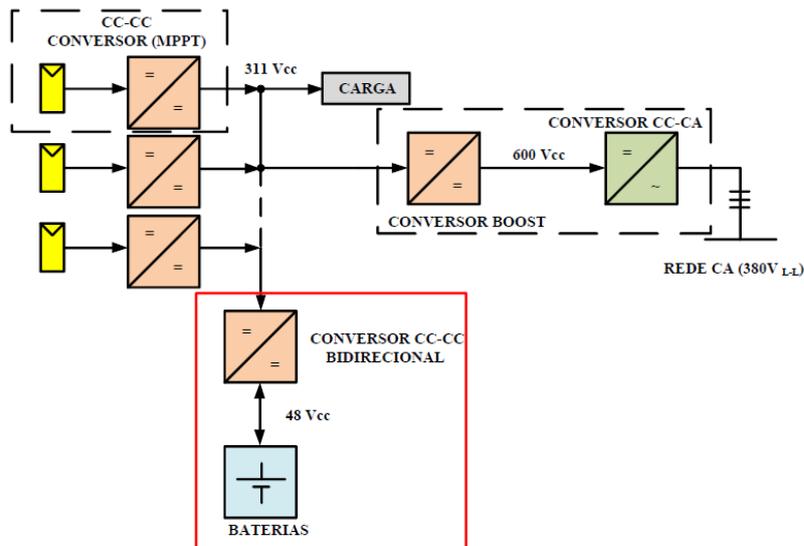


Figura 1 - Sistema fotovoltaico proposto.
Fonte: (Marques, 2012)

3. CONVERSOR PROPOSTO

O conversor c.c.- c.c. *Dual Active Bridge* (DAB) com Célula de Comutação de Três Estados (CCTE) com três portas é baseado em topologias bastante abordadas na literatura . Na Fig. 2 é mostrado o conversor proposto. O DAB foi proposto inicialmente por (De Doncker et al., 1991). Já a CCTE foi proposto inicialmente por (Bascope e Barbi, 2000).

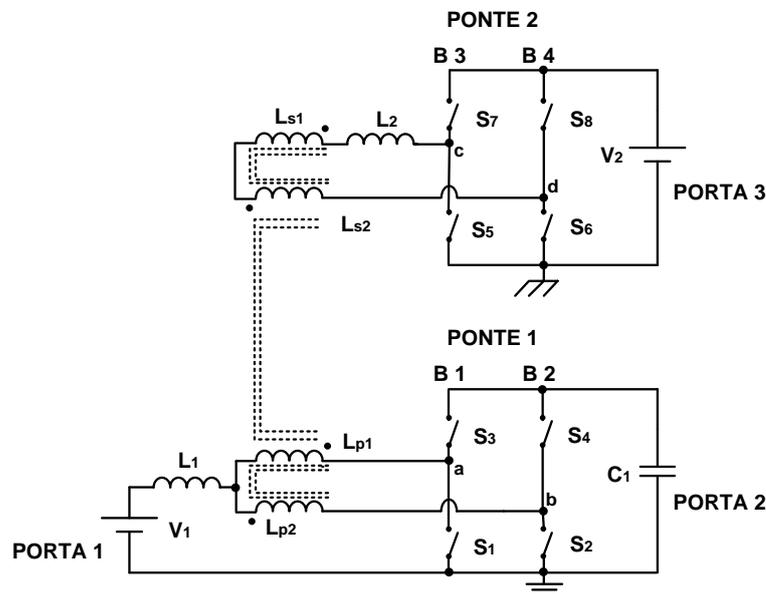


Figura 2 - Conversor DAB CCTE com três portas.

O conversor proposto possui 8 chaves ativas ($S_1 \dots S_8$), um indutor (L_1), um transformador de 4 enrolamentos , sendo toda indutância de dispersão representada por L_2 , dois capacitores, C_1 e C_2 . O conversor é multiporta e possui três portas para o processamento de energia elétrica. O primário do transformador é ligado a célula de comutação de três estados, a porta 1 é conectada ao banco de baterias, a porta 2 é conectada a painéis fotovoltaicos para injetar corrente no barramento c.c. ou no banco de baterias, e a porta 3 é conectada ao barramento c.c. como podemos ver na Fig. 3. Para facilitar o entendimento nas simulações, as correntes e tensões mostradas na figura foram chamadas respectivamente de: I_1 , I_2 e I_3 - Correntes nas portas 1, 2 e 3 e V_1 , V_2 e V_3 - Tensões nas portas 1, 2 e 3.

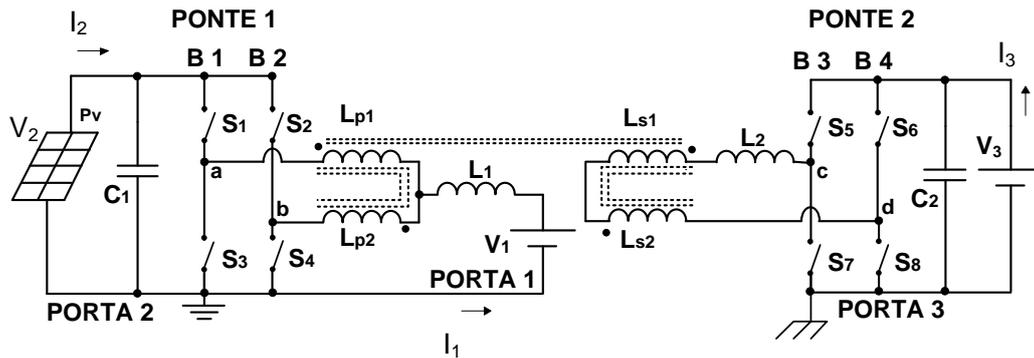


Figura 3 - Conversor DAB CCTE Três portas com Painel Fotovoltaico.

Na Eq. (1) é apresentado o fluxo de potência do DAB, sendo V_1 a tensão na porta 1, V_2 a tensão na porta 2, X_L é a reatância indutiva, L é a indutância de dispersão referida ao primário, a é a relação de transformação e φ é o ângulo de deslocamento (*phase-shift*) das tensões fundamentais da ponte do lado direito e do lado esquerdo.

$$P = \frac{V_1^2}{X_L} d \varphi \left(1 - \frac{|\varphi|}{\pi} \right) \quad (1)$$

$$X_L = \omega L, \quad d = \frac{V_2}{aV_1} \quad (2)$$

4. ESTRATÉGIAS DE MODULAÇÃO

A modulação aplicada ao conversor se baseia na *Phase Shift*. Onde se consiste em aplicar uma razão cíclica D nos interruptores inferiores: S_1 , S_2 , S_5 e S_6 (Fig. 2) e os interruptores superiores serão complementares aos interruptores do mesmo braço. Os braços $B1$ e $B2$ são defasados em 180° na ponte 1, o mesmo acontece na ponte 2 com os braços $B3$ e $B4$. O deslocamento de fase (*phase shift*) é obtido através da defasagem entre os interruptores S_1 e S_5 . Na prática deve existir um tempo morto entre as chaves do mesmo braço para que não ocorra um curto-circuito.

Para uma tensão V_2 com o valor de 124V na porta 2 e com uma tensão V_1 na porta 1 de 48V, usando a Eq. (3) temos um D de 0,61.

$$V_2 = \frac{V_1}{(1-D)} \quad (3)$$

5. PROJETO DO CONVERSOR

Os dados do projeto estão inseridos na Tab. 1. Uma observação a ser feita é que todo dimensionamento foi feito usando valores nominais.

Tabela 1 – Dados de projeto para aplicação do conversor proposto.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potência Nominal	2 kW
Tensão do Banco de Baterias (Porta 1)	48 V
Tensão nos Painéis Fotovoltaicos (Porta 2)	124V
Tensão do Barramento C.C. (Porta 3)	311 V

A tensão na Porta 2 é obtida pela associação de 4 painéis fotovoltaicos com valores nominais unitários de 31 V e potência nominal de 265W cada. O dimensionamento dos componentes do conversor é baseado na região de operação para uma razão cíclica $D=0,61$. A tensão V_{ab} é obtida através da Eq. (4), onde se percebe que é igual a tensão no barramento do capacitor C_1 e que depende do ciclo de trabalho D e da tensão na porta 1, V_1 :

$$V_{ab} = V_{c1} = \frac{V_1}{1-D} \quad (4)$$

Logo, para refletir a tensão V_{ab} para o secundário obtém-se através da Eq. (5), em que a é a relação de transformação do transformador:

$$V_{ab}' = V_{ab} a = \frac{V_1}{1-D} a \quad (5)$$

A Tab. 2 apresenta o valor dos componentes já dimensionados e escolhidos em tabelas seguintes.

Tabela 2 – Componentes do circuito de potência do conversor operando na região $D > 0,5$.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Indutor de entrada (L1)	50 μ H
Indutância de transmissão (L2)	96 μ H
Capacitores da porta 2 e 3 (C1 e C2)	680 μ F
Relação de Transformação (a)	3,9

6. RESULTADOS E SIMULAÇÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados da simulação do conversor. O painel fotovoltaico é simulado utilizando em seu lugar, uma fonte de corrente na porta 2 do conversor.

Nas subseções seguintes serão mostradas as principais formas de onda para o conversor operando com $D=6,1$ ou seja, com ciclo de trabalho $D > 0,5$. Sendo que na simulação em malha aberta foi utilizado $D=0,61$ e $\varphi = -30^\circ$ para o modo carga do bando de baterias, e $\varphi = 30^\circ$ para o modo descarga.

6.1 Modo carga do banco de baterias

Nas Fig. 4 (a), (b) e (c) são apresentadas as formas de onda do conversor carregando o banco de baterias, onde se percebe que a corrente tem sentido negativo tanto no barramento c.c. na porta 3, na porta 2 e no banco de baterias na porta 1. O valor médio da corrente no banco de baterias é de aproximadamente $I_1 = -63,1$ A, na porta 2 onde se encontra o painel fotovoltaico é de $I_2 = -8,5$ A e no barramento C.C. um valor médio de $I_3 = -6,7$ A. As correntes das portas 2 e 3 são de baixos valores comparando-se a corrente da porta 1. Sendo o fluxo de energia entre o primário e o secundário do transformador ser feito pelas portas 2 e 3, conclui-se que a maior corrente circulante no modo carga, está após o transformador responsável pelo fluxo de energia, resultando em um tamanho físico menor do mesmo.

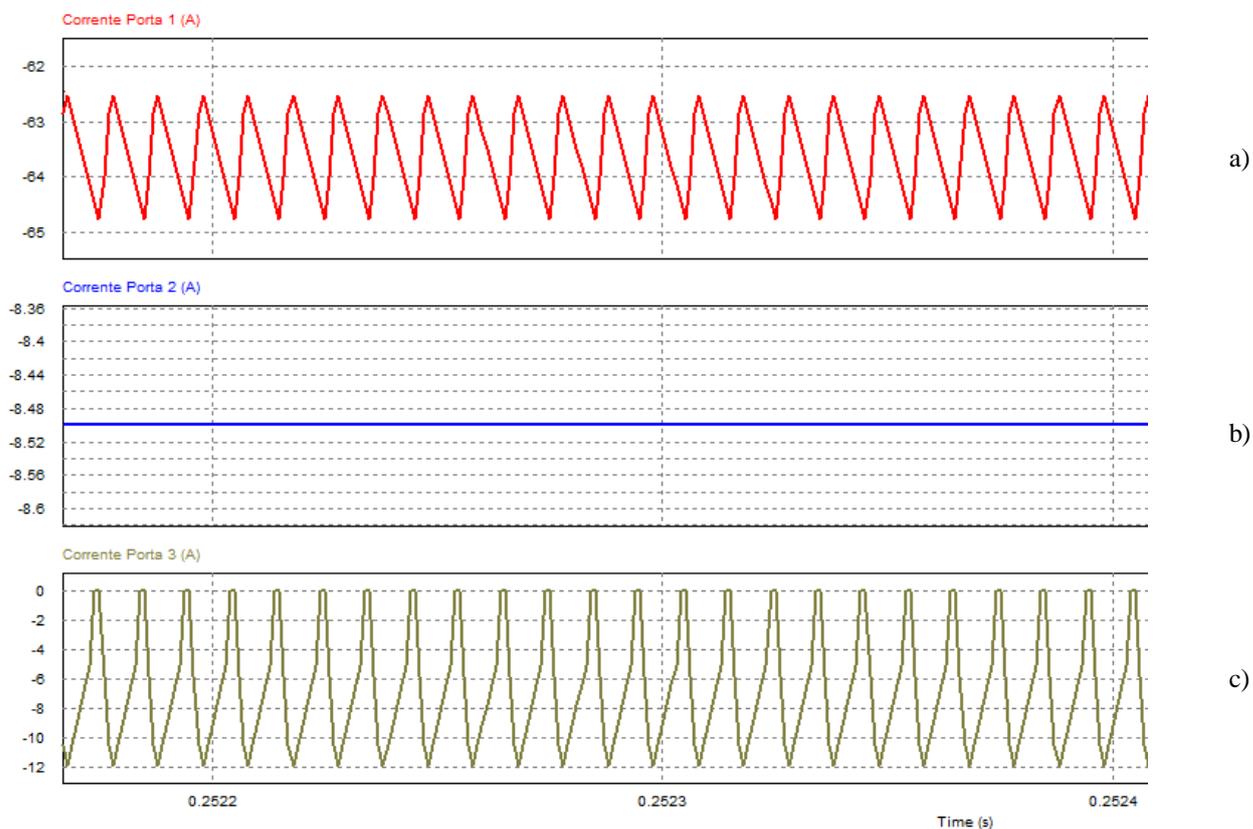


Figura 4 – Formas de onda do conversor c.c.- c.c. bidirecional DAB-CCTE na carga do banco de baterias operando no modo carga do banco de baterias: a) corrente no banco de baterias. b) corrente na porta 2 c) corrente no barramento c.c..

A Fig. 5 apresenta as formas de onda obtidas no conversor para o modo de descarga do banco de baterias com o conversor operando com $D > 0,5$ e a corrente fluindo do banco de baterias para o barramento c.c. . Percebe-se na figura 5 (a) a tensão na porta 2 , onde se localiza o painel fotovoltaico com um valor médio de aproximadamente $V_2=122,6$ V . A fig 5 (b) , na porta 3 onde se localiza o barramento c.c. , a tensão média assume o valor de $V_3=309,4$ V. Valores bastante aproximados com o projeto.

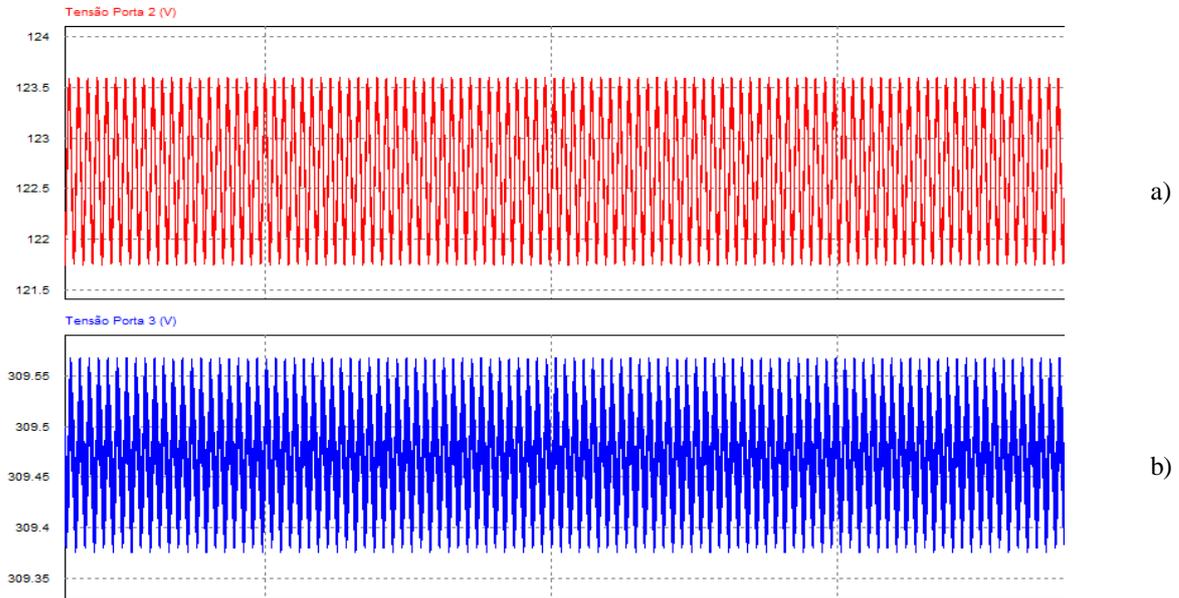


Figura 5 – Formas de onda do conversor c.c.-c.c. bidirecional DAB-CCTE operando no modo descarga: a) Tensão na porta 2 no painel fotovoltaico. b) Tensão na porta 3 na carga.

A Fig. 6 (a) notamos a corrente no banco de baterias no momento da descarga, com um valor médio de $I_1=27,4$ A, na Fig 6 (b) temos a corrente na porta 2 com um valor médio de $I_2=-8,5$ A e na Fig. 6 (c) , no barramento c.c. , uma corrente média de $I_3=7,5$ A na carga.

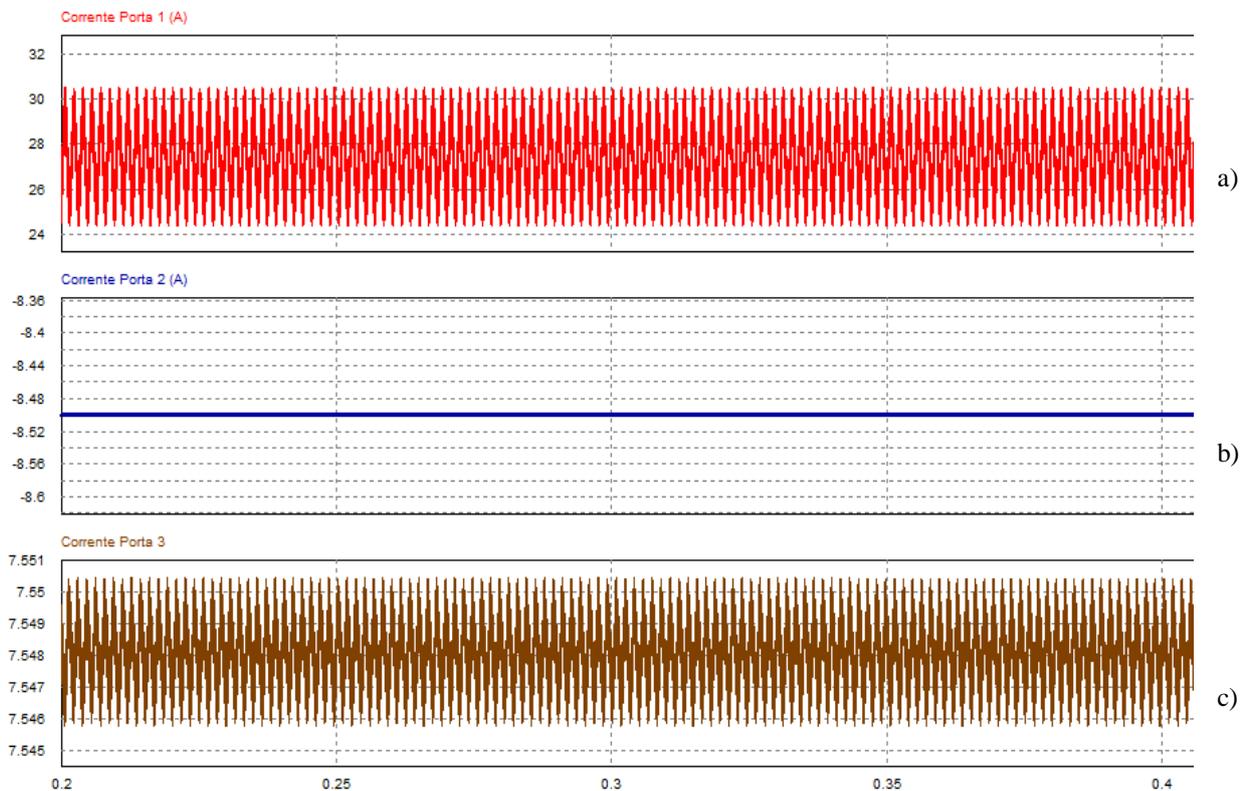


Figura 6 – Formas de onda do conversor c.c.- c.c. bidirecional DAB-CCTE operando no modo descarga: a) Corrente na porta 1 , b) Corrente na porta 2, c) Corrente na porta 3 na carga.

A Fig. 7 mostra as tensões alternadas no primário e secundário do transformador. Podemos notar o defasamento angular ϕ de 30 graus entre as duas tensões.



Figura 7 – Formas de onda do conversor c.c.- c.c. bidirecional DAB-CCTE operando no modo descarga: a) Tensão no primário do transformador , b) Tensão no secundário do transformador.

A Tab. 3, mostra a potência ativa em cada porta do conversor.

Tabela 3 – Potência Ativa de cada porta do conversor c.c.- c.c. bidirecional DAB-CCTE em regime de descarga do banco de baterias

PORTA	POTÊNCIA ATIVA
Porta 1	1,28 KW
Porta 2	-1,17 KW
Porta 3	2,2 KW

6.3 Modo descarga do banco de baterias – degrau de carga

A Fig. 8 apresenta as formas de onda obtidas no conversor para o modo de descarga do banco de baterias com o conversor operando com $D > 0,5$ com um degrau de carga de 50%. A Fig. 8 (a) mostra que a tensão na saída diminui para aproximadamente 164V no instante $t=250ms$, no instante do degrau de 100% para 50%, e só retorna em $t=400ms$ após o degrau de carga de 50% para 100%. Já a Fig. 8 (b) mostra que após o degrau de carga, a corrente tende a retornar para um valor médio de 7,9 A, bastante próximo do valor nominal anterior ao transitório. Quando o degrau de carga ocorre de 50% para 100% da carga os valores de tensão e corrente tendem aos seus valores nominais.

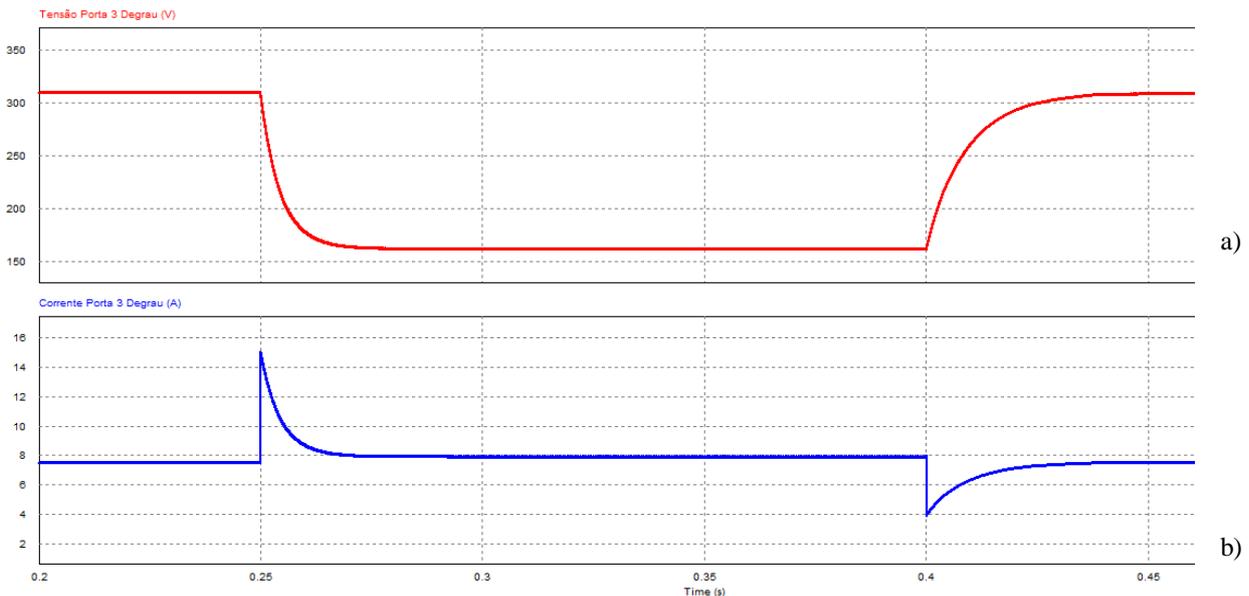


Figura 8 – Formas de onda do conversor c.c.- c.c. bidirecional DAB-CCTE operando no modo descarga com degrau de carga : a) Tensão no barramento c.c. , b) Corrente no barramento c.c..

7. CONCLUSÕES

O conversor c.c.- c.c. bidirecional DAB-CCTE operando com painel fotovoltaico foi apresentado neste artigo. O comportamento do conversor foi mostrado em simulações para comprovar sua aplicabilidade em sistemas fotovoltaicos com banco de baterias, sendo essa necessidade presente em localidades distantes dos sistemas de distribuição, portanto é uma ótima solução para essa aplicação.

Observou-se seu comportamento como fonte de corrente na saída em malha aberta quando aplicado uma carga e viu-se que a tensão e corrente nos terminais de saída se comportaram com valores próximos aos nominais. Ao aplicar um degrau de carga, observou-se que a corrente retornou ao seu valor nominal após o transitório. Outra característica importante a ser observada foi a injeção de corrente na segunda porta do conversor, onde são ligados os painéis fotovoltaicos, aumentando a corrente inversa ao carregar o banco de baterias. Portanto conclui-se que a topologia proposta é aplicável em sistemas fotovoltaicos com banco de baterias, onde se necessita carga ou descarga do banco de baterias.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará – UFC e GPEC pelo espaço e material disponibilizado.

REFERÊNCIAS

- Bascope, G. V. T., Barbi, I., 2000. Generation of a Family of Non-Isolated DC-DC PWM Converters Using New Three State Switching Cells, PESC' 00 - IEEE Power Electronic Specialists Conference, Galway, Irlanda.
- De Doncker, R.W., Divan, D.M., Kheraluwala, M. H., 1991. A three-phase soft-switched high power density DC/DC converter for high power applications, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 27, n. 1, pp. 63-73.
- Dos Santos, W. M. Estudo e implementação do conversor TAB (Triple Active Bridge) aplicado a sistemas renováveis solares fotovoltaicos. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- Duarte, J. L., Hendrix, M., Simoes, M. G., 2007. Three-port bidirectional converter for hybrid fuel cell systems, IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, n. 2, pp. 480–487.
- Kim, J., Jeong, I., Nam, K., 2009. Asymmetric duty control of the dual-active-bridge DC/DC converter for single-phase distributed generators, ECCE - IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, San Jose, EUA.
- Marques, D. D., 2012. Conversor CC-CC Bidirecional de Alto Ganho para Aplicação em Pequenos Sistemas de Geração de Energia Elétrica, Dissertação de Mestrado, UFC, Fortaleza.
- Mazza, L. C. S. Conversor CC-CC Bidirecional DAB Monofásico Baseado na Célula de Comutação de Três Estados. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará.
- Praça, P. P., 2011. Conversores de Alto Ganho de Tensão e Estágio Único, Aplicados a Sistemas de Energias Renováveis com Baterias, Tese de Doutorado, UFC, Fortaleza.

BIDIRECTIONAL CONVERTER WITH THREE-STATE SWITCHING CELL APPLIED IN INDEPENDENT AND PHOTOVOLTAIC SYSTEMS INTEGRATION NETWORK POWER DC.

Abstract. *This article presents a study on the bi-directional DC-DC Converter with Dual Active Bridge Tri-State Switching cell for use in photovoltaic systems and battery bank. It is shown the proposed system for application, the converter operating principle, its ability to charge and discharge a battery bank with a combination of photovoltaic panels, and other features. This battery bank has a nominal voltage of 48 V, 4 photovoltaic panels are used with 31 V voltage each and the total rated power of 1.06 kW, feeding a DC bus 311 V with rated power of 2 kW. The control of power flow and voltage at the output can be obtained for two variables, the phase shift (phase shift - ϕ) between the fundamental voltages of the two bridges and the duty cycle (D) of the power switches. The results of dynamic response to convresor are shown operating with a duty cycle greater than 0.5 in loading rate discharge of the battery bank, the latter being simulated with a resistive load. It can see his natural ability to behave as a current source DC bus and photovoltaic panels.*

Keywords: *battery bank, bidirectional, dual active bridge, photovoltaic systems, phase-shift.*