

ANÁLISE DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO BASEADO EM UM INVERSOR MULTINÍVEL COM TRANSFORMADORES EM CASCATA USANDO UM CONVERSOR CC-CC *BOOST*

Maria Carolina Félix Figueirôa de França * Nady Rocha *
Darlan Alexandria Fernandes * Laysa Lucia de Souza *
Filipe Antônio da Costa Bahia **

* *Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB (e-mails:
[maria.franca, nadyrocha, darlan, laysa.souza]@cear.ufpb.br)*

** *Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, BA (e-mail:
filipe.bahia@ufba.br)*

Abstract: In this work, an analysis of a two-stage photovoltaic system connected to the power grid is performed, composed of a DC-DC converter type *boost* and a multilevel DC-AC converter with cascade transformers with reduced number of components. The DC-AC converter has three legs, one being shared between the primary windings of two low-frequency transformers that have the secondary windings (single-phase grid side) connected in series. The simulation results are presented and analyzed for two conditions, one with a set of panels that do not undergo shading and the other with a set of panels that undergo partial shading. According to the results it is possible to see that the system generates output multilevel voltage, with less harmonic distortion when compared to the conventional DC-AC converter.

Resumo: Neste trabalho é realizada a análise de um sistema fotovoltaico de dois estágios conectado a rede elétrica, composto por um conversor CC-CC tipo *boost* e um conversor multinível CC-CA com transformadores em cascata com número reduzido de componentes. O conversor CC-CA possui três braços, sendo um compartilhado entre os enrolamentos do primário de dois transformadores de baixa frequência que têm os enrolamentos do secundário (lado da rede monofásica) conectados em série. Os resultados de simulação são apresentados e analisados para duas condições, uma com um conjunto de painéis que não sofrem sombreamento e outra com um conjunto de painéis que sofrem um sombreamento parcial. A partir dos resultados é possível perceber que o sistema gera tensão multinível na saída, com menor distorção harmônica quando comparado com o conversor CC-CA convencional.

Keywords: DC-DC converter; multilevel DC-AC converter; photovoltaic system; partial shading.

Palavras-chaves: Conversor CC-CC; conversor multinível CC-CA; sistema fotovoltaico; sombreamento parcial.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, houve crescimento acentuado na demanda de energia elétrica no mundo todo. Em 1980, o mundo consumia cerca de 7.000 TWh (terawatts-hora) de eletricidade, de acordo com Villalva and Gazoli (2012), e esse número pode subir para quase 30.000 TWh em 2030, segundo as previsões da Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency* - IEA). Para suprir esta demanda seriam necessárias 230 usinas hidrelétricas similares a de Itaipu ou 1.000 usinas nucleares iguais a de Fukushima, porém não haveria rios suficientes e o uso de energia nuclear tem sido evitado devido aos riscos envolvidos em sua utilização. A construção de usinas

termelétricas movidas a combustíveis fósseis poderia ser uma opção, porém, além de apresentar um custo final de energia elevado, o seu uso gera uma grande liberação de gases poluentes na atmosfera, os quais são responsáveis pelo aumento do efeito estufa e aquecimento global.

Como resultado, a busca pela utilização de fontes alternativas de geração de energia elétrica tem crescido expressivamente, principalmente as energias eólica e solar, por serem consideradas inesgotáveis aos padrões humanos de utilização. Baseado nos dados apresentados em Dudley et al. (2018), o uso das energias elétricas renováveis cresceu cerca de 16,2 % em âmbito mundial entre os anos de 2006 a 2016 e 17 % no ano de 2017, sendo a energia eólica

responsável por mais da metade deste crescimento e a energia solar fotovoltaica por mais de um terço.

De acordo com Lopez (2012), um sistema fotovoltaico pode ser classificado de três formas: isolado (ou autônomo), híbrido e conectado à rede elétrica. Uma representação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica composto por módulos fotovoltaicos, sistema de processamento, filtro e transformador de baixa frequência é mostrada na Figura 1. O estágio de processamento de energia é classificado em um ou dois estágios. O sistema de dois estágios consiste de um conversor CC-CC conectado a um conversor CC-CA, enquanto o sistema de um estágio não utiliza o conversor CC-CC (Basu and Maiti, 2019). O conversor CC-CC com a estratégia de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) pode ser do tipo *Boost*, *Buck-Boost* ou *Push-Pull*.

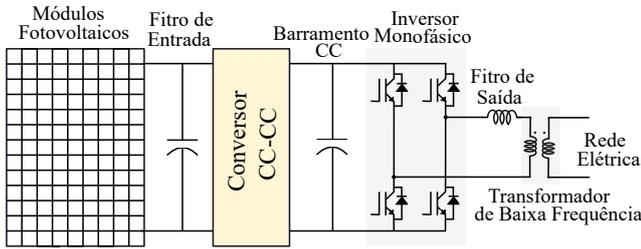


Figura 1. Sistema fotovoltaico convencional.

A conexão com a rede elétrica é realizada a partir de conversores CC-CA monofásicos ou trifásicos. Neste contexto, diferentes topologias de conversores CC-CA de dois níveis ou mais níveis têm sido proposto na literatura técnica. Os inversores multiníveis têm interessantes características como melhor qualidade da tensão gerada, menor d_v/d_t , corrente com menor distorção harmônica, minimizando problemas de ruído e compatibilidade eletromagnética (Pires et al., 2011). Em sistemas fotovoltaicos, topologias multiníveis do tipo NPC (*neutral point clamped*) (Sezen et al., 2014; Andrade and da Silva, 2015; Iturriaga-Medina et al., 2016), capacitor flutuante (*flying capacitor*), conversores em cascata (*cascaded multilevel converters*) (Amaral et al., 2018), conversor multinível modular (MMC-*Modular Multilevel Converter*) (Nademi et al., 2016; Basu and Maiti, 2019) e, mais recentemente, conversores multinível com transformadores em cascata (Pires et al., 2011; Kang et al., 2005) vêm sendo propostas e analisadas na literatura técnica.

Em Pires et al. (2011), foi analisada uma topologia com um inversor de quatro braços e dois inversores monofásicos conectados a um transformador do tipo Scott. Como desvantagens do sistema pode-se destacar a utilização de um transformador não convencional e problema de balanceamento devido à utilização de diferentes *strings* para alimentação dos três barramentos do conversor. Em Kang et al. (2005) um sistema fotovoltaico residencial de dois estágios, utilizando um conversor tipo *Buck* e um conversor multinível com transformador em cascata é apresentado. O uso de transformadores em cascata elimina ou minimiza a utilização de um filtro de saída.

Neste trabalho, um sistema fotovoltaico de dois estágios conectado à rede elétrica é analisado. Este sistema é com-

posto por um conversor CC-CC tipo *boost* e um conversor Multinível CC-CA com transformadores em cascata com número reduzido de componentes, como ilustrado na Figura 2. O conversor CC-CA possui três braços, sendo um compartilhado entre os enrolamentos do primário de dois transformadores de baixa frequência, cujo enrolamentos do secundário (lado da rede) conectados em série. Os resultados são analisados em duas situações:

- 1) O conjunto de painéis não sofrem sombreamento;
- 2) O conjunto de painéis sofrem um sombreamento parcial.

A partir dos resultados será possível perceber que o sistema gera tensão multinível da saída, com menor distorção harmônica e mantém a tensão do barramento CC constante.

2. SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA MONOFÁSICA

O modelo do sistema fotovoltaico proposto está apresentado na Figura 2. Neste sistema, o conjunto de painéis fotovoltaicos é conectado à rede elétrica por meio da ligação de um conversor CC-CC do tipo *boost* com um conversor multinível CC-CA de três braços com dois transformadores conectados em cascata. O conversor *boost* é controlado para rastrear o ponto de máxima potência (MPPT) do gerador fotovoltaico utilizando a técnica *Perturba & Observa* (*P&O*), como proposto em Huang et al. (2015). O conversor multinível CC-CA é chaveado por meio de uma técnica de modulação baseada em razão cíclica, ao passo que seu barramento CC é regulado por uma estratégia de controle.

2.1 Painel (ou módulo) Fotovoltaico

As células fotovoltaicas são dispositivos fotovoltaicos básicos, os quais são agrupadas formando módulos fotovoltaicos, de tal modo a produzir uma dada tensão e correntes específicas. O circuito equivalente simplificado de uma célula fotovoltaica está apresentado na Figura 3.

De acordo com Masters (2013), as equações que o modelam são dadas por:

$$I = I_{sc} - I_d \quad (1)$$

$$I_d = I_{sc} - I_o(e^{qV_d/AKT} - 1) \quad (2)$$

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o} + 1\right) \quad (3)$$

onde I é a corrente entregue à carga, I_{sc} é a corrente na fonte, I_d é a corrente no diodo, I_o é a corrente de saturação reversa, q é a constante de carga do elétron, K é a constante de Boltzman, T é a temperatura em graus celsius, A é o fator de idealidade, V_d é a tensão no diodo e V_{oc} é a tensão de circuito aberto.

O modelo de painel fotovoltaico utilizado neste trabalho e implementado no ambiente computacional PSIM foi o *physical model* (modelo físico) presente no *software*, cujas especificações elétricas para as condições padrão de teste (irradiância igual a 1000 W/m^2 e temperatura igual a 25°C) estão apresentadas na Tabela 1.

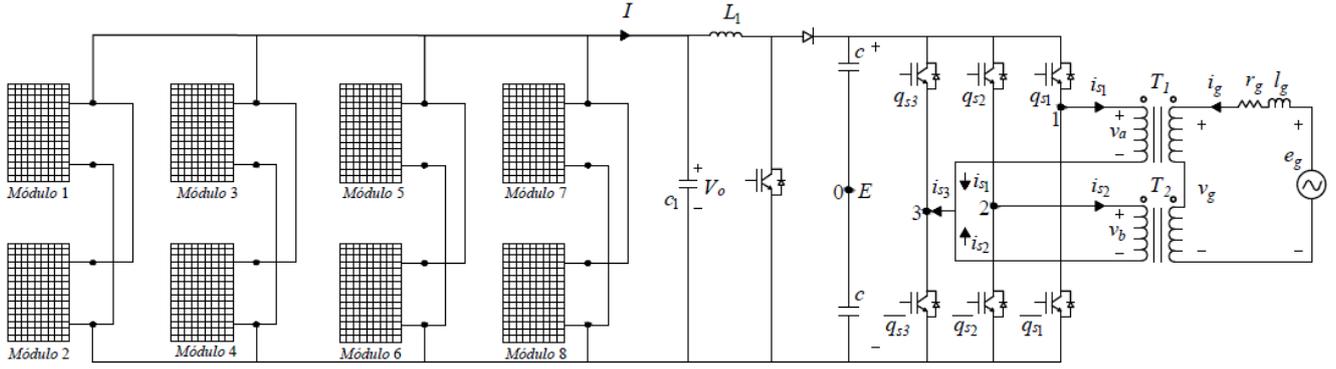


Figura 2. Sistema fotovoltaico conectado à rede monofásica proposto.

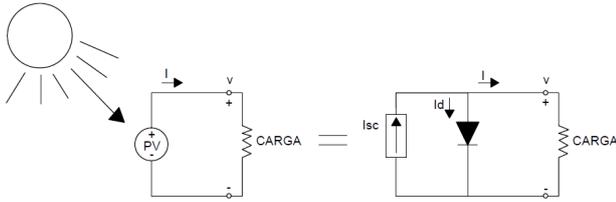


Figura 3. Célula fotovoltaica simplificada.

Tabela 1. Parâmetros do painel fotovoltaico.

Grandeza	Valor
Máxima Potência (P_{max})	60 W
Tensão na Máxima Potência (V_{max})	17,1 V
Corrente na Máxima Potência (I_{max})	3,5 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	21,1 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	3,8 A
Coefficiente de Temperatura para V_{oc}	-0,38 (%/°C ou K)
Coefficiente de Temperatura para I_{sc}	0,065 (%/°C ou K)

Modos de conexão Segundo Villalva and Gazoli (2012) os painéis podem ser conectados em série, paralelo e série-paralelo para atingir níveis desejados de tensão e corrente. Ao comparar os efeitos do sombreamento em cada uma dessas conexões, o melhor rendimento é apresentado por módulos conectados em paralelo, conforme visto em Budala et al. (2013) e Jazayeri et al. (2013). Deste modo, escolheu-se este tipo de junção de módulos para ser aplicado neste trabalho.

2.2 Conversor CC-CC do tipo Boost

De acordo com Martins and Barbi (2006), o conversor *boost* pode ser modelado através das seguintes equações:

$$\frac{V_o}{E} = \frac{1}{1-D} \quad (4)$$

$$L_1 = \frac{E}{f_s \Delta I} D \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{P_o}{4\pi f E \Delta V_o} \quad (6)$$

onde V_o é a tensão média na carga, E é a tensão média na fonte, D é a razão cíclica, P_o é a potência processada, L_1 é a indutância, ΔI é a ondulação de corrente, C_1 é a capacitância, ΔV_o é a ondulação da tensão de saída, f_s é a frequência de chaveamento e f é a frequência presente no barramento CC do sistema monofásico.

2.3 Conversor multinível CC-CA

No sistema proposto, tem-se um conversor multinível CC-CA de três braços com dois transformadores idênticos (T_1 e T_2) conectados em cascata, os quais garantem um isolamento elétrico entre a rede e o conversor. As equações que modelam esta parte do sistema estão apresentadas a seguir:

$$e_g = r_g i_g + l_g \frac{d i_g}{dt} + v_g \quad (7)$$

$$v_g = (v_a + v_b) \eta \quad (8)$$

$$i_{sk} = \eta i_g \quad (9)$$

onde $k = 1, 2$, e_g é a tensão da rede, i_g é a corrente da rede, i_{sk} são as correntes de entrada do conversor CC-CA, η é a relação de transformação dos transformadores, v_g é a tensão gerada no secundário dos transformadores, v_a é a tensão no primário do transformador T_1 , v_b é a tensão no primário do transformador T_2 , r_g e l_g representam a resistência e a indutância do filtro.

Estratégia de controle Na Figura 4 é apresentado o diagrama de blocos de controle para regular a tensão do barramento CC do conversor CC-CA. A tensão E é ajustada ao seu valor de referência E^* usando o controlador Proporcional e Integral (PI) convencional, que, por sua vez, fornece a amplitude da corrente de referência da rede i_g^* . Para obter elevado fator de potência, a corrente de referência é sincronizada com a tensão da rede e_g a partir de uma PLL (*Phase-Locked Loop*), conforme apresentado em (Santos Filho et al., 2008). A tensão de referência no secundário dos transformadores (v_g^*) é obtida por meio do controlador de dupla sequência (GI), apresentado em (Jacobina et al., 2001).

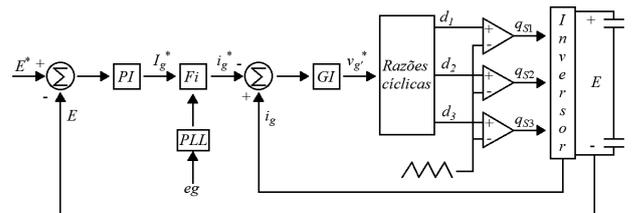


Figura 4. Diagrama de blocos de controle para regular a tensão do barramento CC do conversor CC-CA.

Estratégia de modulação A estratégia de modulação utilizada no conversor proposto é baseada em calcular a razão cíclica de cada chave, através da escolha apropriada dos estados das chaves. Na Tabela 2 são apresentados os estados das chaves e as tensões v_a , v_b e v_g , que são as tensões dos transformadores T_1 , T_2 e de saída, respectivamente.

Tabela 2. Estados das chaves e tensões geradas pelo sistema proposto.

Chaves			T_1	T_2	Saída
q_{s1}	q_{s2}	q_{s3}	v_a	v_b	v_g
1	1	0	E	E	2E
0	1	0	0	E	E
1	0	0	E	0	E
0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0
0	1	1	-E	0	-E
1	0	1	0	-E	-E
0	0	1	-E	-E	-2E

A topologia do conversor com três braços com dois transformadores em cascata pode produzir cinco níveis de tensão ($2E$, E , 0 , $-E$ e $-2E$) e a razão cíclica de cada chave pode ser determinada, para quatro setores da tensão de referência (v_g^*) desejada na saída do conversor. Cada setor é delimitado pelos dois níveis de tensão mais próximos, um de maior valor (v_{high}) e outro de menor valor (v_{low}), conforme apresentado na Figura 5.

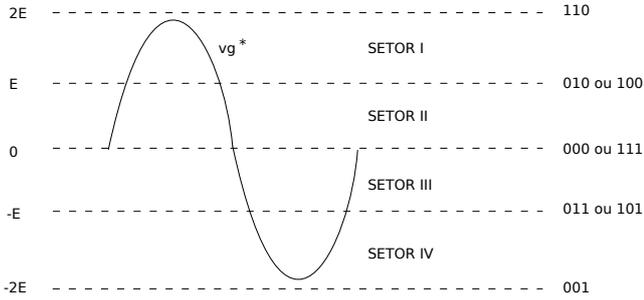


Figura 5. Setores da PWM.

Quando $E < v_g^* \leq 2E$, os níveis de tensão V_{high} são produzidos pelo estado $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 110$ e V_{low} é produzido pelos estados (redundantes) $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 010$ ou $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 100$, representando o setor I. Por outro lado, quando $0 < v_g^* \leq E$, os níveis de tensão V_{high} são produzidos pelos estados (redundantes) $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 010$ ou $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 100$ e V_{low} é produzido pelos estados (redundantes) $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 000$ ou $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 111$, representando o setor II.

Quando $-E < v_g^* \leq 0$, os níveis de tensão V_{high} são produzidos pelos estados (redundantes) $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 000$ ou $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 111$ e V_{low} é produzido pelos estados (redundantes) $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 011$ ou $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 101$, representando o setor III. Por outro lado, quando $-2E < v_g^* \leq -E$, os níveis de tensão V_{high} são produzidos pelos estados (redundantes) $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 011$ ou $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 101$ e V_{low} é produzido pelo estado $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 001$, representando o setor IV.

A razão cíclica (d) de cada chave pode ser calculada a partir do valor médio de v_g^* entre V_{high} e V_{low} normalizados

entre 0 e 1. A atribuição de valores para a razão cíclica é dada pela seguinte lógica:

- 1) Se o estado das chaves permanecer 1, então $d = 1$;
- 2) Se o estado das chaves permanecer 0, então $d = 0$;
- 3) Se o estado das chaves mudar de 1 para 0, então

$$d = \left(\frac{v_g^* - V_{low}}{V_{high} - V_{low}} \right) \quad (10)$$

- 4) Se o estado das chaves mudar de 0 para 1, então

$$d = \left(\frac{V_{high} - v_g^*}{V_{high} - V_{low}} \right) \quad (11)$$

Tomando o setor I como exemplo, tem-se que V_{high} é dado por $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 110$. Escolhendo-se para V_{low} $[q_{s1}; q_{s2}; q_{s3}] = 010$, pode-se inferir que: o estado da chave q_{s1} muda de 1 para 0, a razão cíclica será calculada pela Equação (10), o estado da chave q_{s2} permanece igual a 1 e o estado da chave q_{s3} permanece igual a 0.

3. RESULTADOS E ANÁLISES DE SIMULAÇÃO

Com a finalidade de estudar a dinâmica da conexão dos módulos fotovoltaicos com a rede elétrica, as configurações apresentadas nas Figuras 1 e 2 foram implementadas no ambiente computacional PSIM. Os parâmetros utilizados para o desenvolvimento das simulações estão expostos na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de simulação.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
L_1	2,1504 mH	ΔI	7,5
E	100 V	ΔV_o	0,44
V_o	17,1 V	η	1 : 1
c	3000 μF	r_g	0,1 Ω
f_s	15 kHz	l_g	6 mH
f	120 Hz	e_g	127 VRMS
c_1	2,4819 mF		

A análise do sistema apresentado na Figura 2 será feita para dois casos. Para o caso 1, onde não há sombreamento dos módulos fotovoltaicos, todos os painéis estavam submetidos à mesma irradiância solar de $1000 W/m^2$ e a temperatura de $25^\circ C$.

Para o caso 2, houve um sombreamento parcial do conjunto de painéis, no qual os módulos 1, 2, 3 e 4 foram submetidos à uma irradiância de $500 W/m^2$ e os módulos 5, 6, 7 e 8 à uma irradiância de $1000 W/m^2$. O tempo total de simulação foi mantido em dois segundos em ambos os casos e a temperatura permaneceu $25^\circ C$.

3.1 Caso 1

Levando-se em consideração os dados fornecidos da Tabela 1 e considerando-se que há um conjunto de oito módulos em paralelo, o valor da corrente na máxima potência (I_{max}) é igual a 28 A. Na Figura 6 é mostrada a corrente fornecida pelo conjunto de painéis fotovoltaicos. Pode-se observar que o resultado condiz com o valor teórico.

A tensão gerada pelo conjunto fotovoltaico é igual à tensão na máxima potência (V_{max}) apresentada na Tabela 1. A tensão fornecida pelo conversor *boost* (E) foi projetada para um valor de 100 V. Na Figura 7 é mostrado os resultados para ambas as tensões.

O controle do conversor *boost* foi realizado através do método P&O. Como mostrado na Figura 8, vê-se que a potência (P) gerada pela estratégia de MPPT está seguindo a soma das potências individuais de cada um dos oito módulos fotovoltaicos (P_{max}). Portanto, o controle está funcionando de modo adequado.

Na Figura 9 são mostradas as tensões de polo v_{10} , v_{20} e v_{30} nos braços do conversor CC-CA, com um *offset* de +165 em v_{10} e -165 em v_{30} . Como pode ser notado, v_{10} possui uma frequência de chaveamento elevada, igual a 10 kHz, enquanto v_{20} e v_{30} possuem baixa frequência de chaveamento.

Tensões geradas pelos transformadores T_1 (v_a) e T_2 (v_b) são mostradas na Figura 10. Com o intuito de melhorar a visualização foi dado um *offset* de +250 em v_a . Como pode ser observado, devido à escolha dos estados das chaves do conversor CC-CA, a tensão sintetizada por T_2 opera em baixa frequência de chaveamento, enquanto a tensão fornecida por T_1 opera em alta frequência.

A tensão de saída, que é fornecida à rede monofásica, apresenta cinco níveis bem definidos, resultantes da estratégia de modulação, acarretando na redução da distorção harmônica, como mostrado na Figura 11.

Na Figura 12 é mostrada a corrente de referência, a corrente de saída, que é fornecida à rede monofásica, e o erro gerado entre as duas. Como pode ser visto, a estratégia de controle opera adequadamente, de modo que a corrente de saída segue a corrente de referência, resultando em um erro praticamente nulo.

As correntes i_{s1} , i_{s2} e i_{s3} , nos braços do conversor CC-CA, são mostrados na Figura 13. Como pode ser verificado, a corrente i_{s3} é o resultado da somas das correntes i_{s1} e i_{s2} . Para melhorar a visualização um *offset* de +33 foi dado na corrente i_{s1} e um *offset* de +55 foi dado na corrente i_{s2} .

As taxas de distorção harmônica da corrente injetada na rede (THD - *Total Harmonic Distortion*) do sistema convencional (Figura 1) e do sistema proposto neste trabalho (Figura 2) são apresentadas na Tabela 4. Percebe-se que o sistema proposto nesse trabalho garante a redução de 7,46% da THD comparado com o sistema convencional, devido à tensão multinível gerada.

Tabela 4. Distorção harmônica total.

Sistema	THD
Convencional	5,23 %
Proposto	4,84 %

3.2 Caso 2

Após o sombreamento parcial nos painéis fotovoltaicos, há queda na corrente gerada. Na Figura 14 é mostrado o resultado para esta situação, onde é possível perceber que a corrente passa a ter um valor de 21 A.

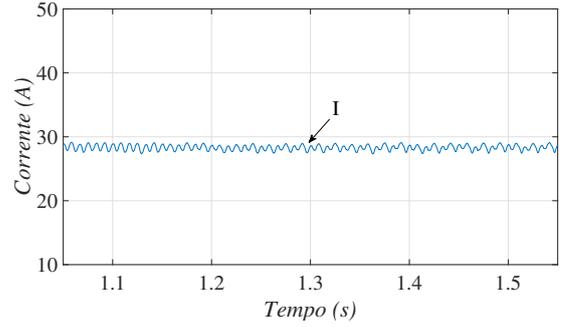


Figura 6. Caso 1: Corrente do conjunto de painéis fotovoltaicos.

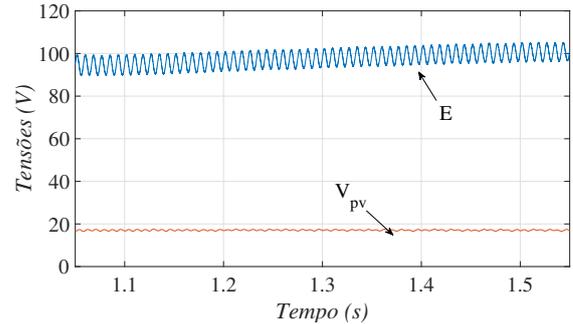


Figura 7. Caso 1: Tensão fornecida pelo conjunto fotovoltaico e tensão entregue ao conversor CC-CA.

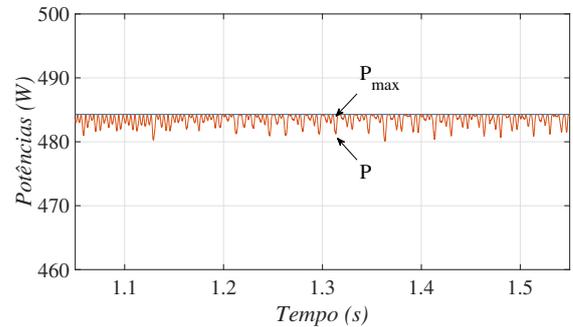


Figura 8. Soma das potências dos painéis fotovoltaicos e a potência gerada pelo controle P&O.

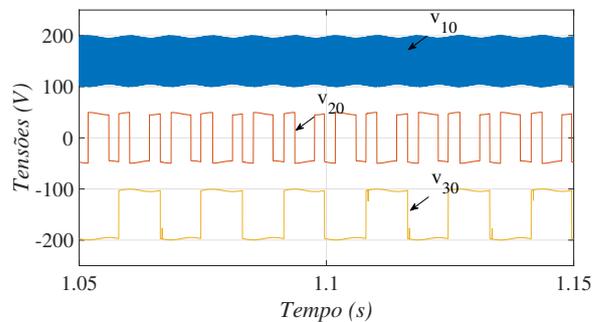


Figura 9. Tensões de polo nos braços do conversor CC-CA.

A tensão gerada pelo conjunto fotovoltaico e a tensão fornecida pelo conversor *boost* mantém-se com os mesmos resultados do *Caso 1*, devido ao valor da tensão nos terminais do conjunto sofrer influência da variação de

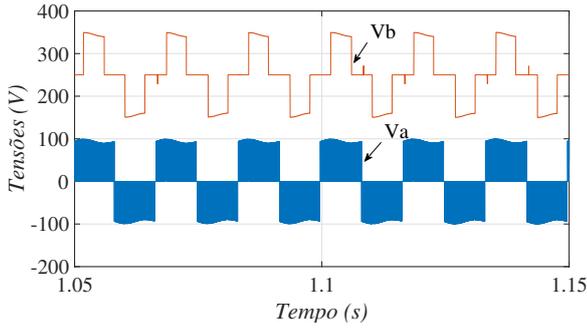


Figura 10. Tensões nos transformadores T_1 e T_2 .

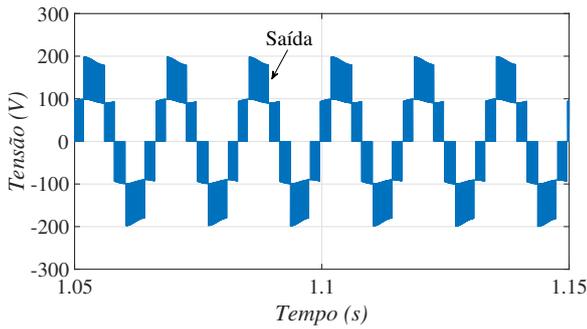


Figura 11. Tensão de saída fornecida à rede monofásica.

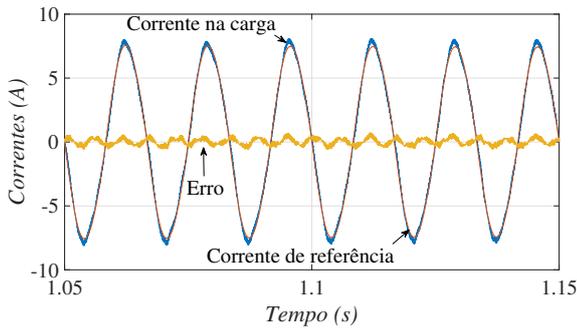


Figura 12. Corrente de referência, corrente entregue à rede monofásica e erro.

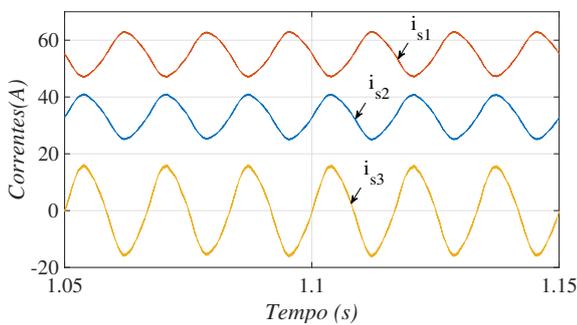


Figura 13. Correntes nos braços do conversor CC-CA.

temperatura como visto em Villalva and Gazoli (2012) e para ambos os casos a temperatura se mantém constante e igual a $25^{\circ}C$. Deste modo, como a tensão na entrada do conversor *boost* não é alterada, a tensão na sua saída permanecerá a mesma. Na Figura 15 é mostrado o resultado para a referida situação.

A soma das potências dos painéis fotovoltaicos e a potência gerada pelo controle *P&O* são mostradas na Figura 16. Devido à queda na corrente, os valores de potência também diminuiram em relação ao resultado apresentado no *Caso 1*, assumindo um valor de aproximadamente $360 W$.

A tensão entregue à rede monofásica é apresentada na Figura 17 e possui o mesmo valor do *Caso 1*.

A corrente entregue à rede monofásica, a corrente de referência e o erro são mostrados na Figura 18. Estas correntes sofreram uma redução em relação às apresentadas para o *Caso 1* devido ao sombreamento parcial.

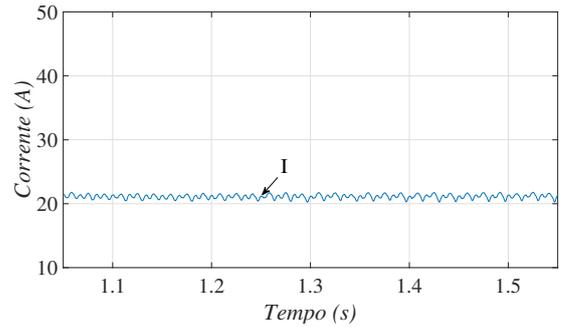


Figura 14. Caso 2: Corrente do conjunto de painéis fotovoltaicos.

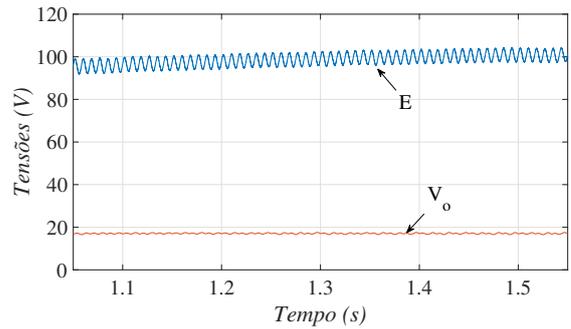


Figura 15. Caso 2: Tensão fornecida pelo conjunto fotovoltaico e tensão entregue ao conversor CC-CA.

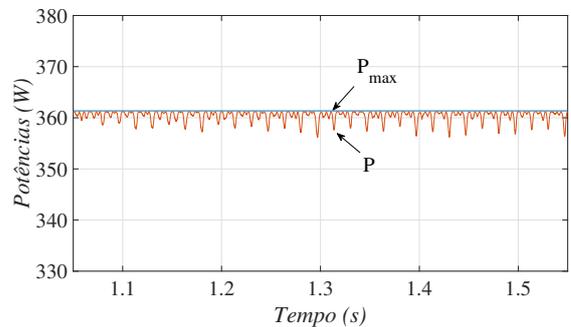


Figura 16. Soma das potências dos painéis fotovoltaicos e a potência gerada pelo controle *P&O*.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica monofásica composto por um conjunto

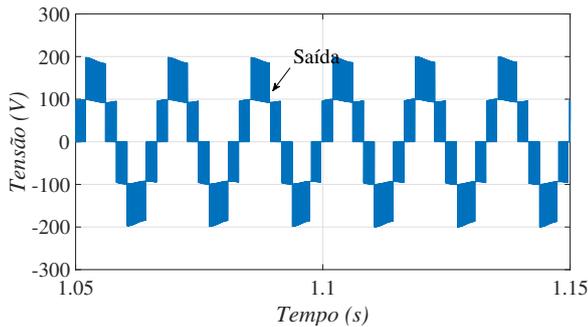


Figura 17. Tensão de saída fornecida à rede monofásica.

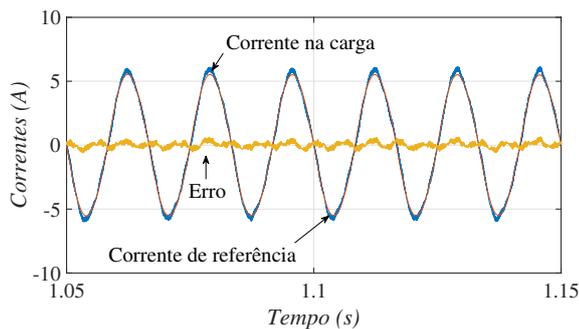


Figura 18. Corrente de referência, corrente entregue à rede monofásica e erro.

de painéis fotovoltaicos ligados a um conversor CC-CC do tipo *boost* e um conversor multinível CC-CA de três braços com dois transformadores conectados em cascata. Duas condições de operação foram apresentadas, uma com um conjunto de painéis que não sofrem sombreamento (*Caso 1*) e outra com um conjunto de painéis que sofrem um sombreamento parcial (*Caso 2*). Comparando os dois casos é possível perceber que o *Caso 2* apresenta uma queda na corrente e na potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos. No entanto, o sistema proposto conseguiu manter a tensão gerada na saída no conversor CC-CA mesmo para a condição de sombreamento parcial. A partir dos resultados é possível observar que o sistema gera tensão multinível na saída, com menor distorção harmônica quando comparado com o conversor CC-CA convencional.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

Amaral, F.V., Parreiras, T.M., Lobato, G.C., Machado, A.A.P., Pires, I.A., and de Jesus Cardoso Filho, B. (2018). Operation of a grid-tied cascaded multilevel converter based on a forward solid-state transformer under unbalanced pv power generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 5493–5503.

Andrade, A.S. and da Silva, E.R.C. (2015). Dc-link control of a three-level npc inverter fed by shaded photovoltaic system. In *2015 IEEE 13th Brazilian*

Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 1–5.

Basu, T.S. and Maiti, S. (2019). A hybrid modular multilevel converter for solar power integration. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(5), 5166–5177.

Buddala, S.S., Vemuru, S., and Devabhaktuni, V. (2013). Small signal modeling of diode in a parallel module subjected to partial shading. In *IEEE International Conference on Electro-Information Technology, EIT 2013*, 1–5.

Dudley, B. et al. (2018). Bp statistical review of world energy. *BP Statistical Review, London, UK*, accessed Aug, 6, 2018.

Huang, C., Itako, K., Mori, T., and Ge, Q. (2015). Mpp control system for pv generation system with mismatched modules. *Journal of Energy and Power Engineering*, 9, 83–90.

Iturriaga-Medina, S., Limones-Pozos, C., Martinez-Rodriguez, P., Escobar, G., Sosa, J., Valdez-Fernandez, A., and Martinez-Garcia, J. (2016). A comparative analysis of grid-tied single-phase transformerless five-level npc-based inverters for photovoltaic applications. In *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, 323–328. IEEE.

Jacobina, C.B., de Rossiter Correa, M.B., Pinheiro, R.F., da Silva, E.R.C., and Lima, A.M.N. (2001). Modeling and control of unbalanced three-phase systems containing PWM converters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 37(6), 1807–1816.

Jazayeri, M., Uysal, S., Jazayeri, K., and Yapici, S. (2013). Experimental analysis of effects of connection type on pv system performance. In *2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 190–195.

Kang, F.s., Cho, S.E., Park, S.J., Kim, C.U., and Ise, T. (2005). A new control scheme of a cascaded transformer type multilevel PWM inverter for a residential photovoltaic power conditioning system. *Solar Energy*, 78(6), 727–738.

Lopez, R.A. (2012). Energia solar para produção de eletricidade. *São Paulo: Artliber*.

Martins, D.C. and Barbi, I. (2006). *Eletrônica de Potência: conversores cc-cc básicos não isolados*. Edição dos Autores.

Masters, G.M. (2013). *Renewable and efficient electric power systems*. John Wiley & Sons.

Nademi, H., Elahidoost, A., and Norum, L.E. (2016). Comparative analysis of different mppt schemes for photovoltaic integration of modular multilevel converter. In *2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 1–5.

Pires, V.F., Martins, J., and Hao, C. (2011). A modular multilevel power converter system for photovoltaic applications. In *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, 1–5. IEEE.

Santos Filho, R.M., Seixas, P.F., Cortizo, P.C., Torres, L.A.B., and Souza, A.F. (2008). Comparison of three single-phase pll algorithms for ups applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(8), 2923–2932.

Sezen, S., Aktas, A., Ucar, M., and Ozdemir, E. (2014). A three-phase three-level npc inverter based grid-

connected photovoltaic system with active power filtering. In *2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, 1331–1335. IEEE.

Villalva, M.G. and Gazoli, J.R. (2012). *Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações*. São Paulo: Érica.