

PROJETO E SIMULAÇÃO DE CONVERSOR C.C.-C.A. MONOFÁSICO PARA CONEXÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO À REDE ELÉTRICA

Heron Alves dos Santos – santos.heron@gmail.com
João Aberides Ferreira Neto – joaoaferreiraneto@hotmail.com
Fernando Luiz Marcelo Antunes – fantunes@dee.ufc.br
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Nos últimos anos, a energia solar fotovoltaica tem se tornado cada vez mais competitiva no cenário mundial, fazendo com que sua participação na matriz elétrica apresente uma forte expectativa de crescimento. Tamaña expectativa teve como consequência um aumento significativo na conexão desses sistemas à rede elétrica. Para que a interligação com a rede elétrica convencional seja possível, é indispensável a utilização de conversores c.c.-c.a., capazes de adequar as características da energia disponibilizada pelos módulos fotovoltaicos aos padrões da rede. O presente artigo apresenta uma proposta de projeto de conversor c.c.-c.a. de 2 kW para conexão de um sistema de conversão fotovoltaica à rede elétrica monofásica de 220 V_{rms}, de modo a possibilitar a injeção de corrente em fase com a tensão da rede e com baixo conteúdo harmônico, além da absorção de potência da rede, a fim de alimentar as cargas c.c. e carregar um banco de baterias, quando as fontes fotovoltaicas não tiverem condições de suprir energia suficiente. O estudo realizado mostra, através de simulação, que, com a aplicação de uma estratégia de controle adequada, é possível controlar o sentido do fluxo de potência do conversor, assim como modular apropriadamente a corrente injetada ou absorvida da rede.

Palavras-chave: Geração fotovoltaica, Conversores estáticos, Conexão à rede.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, vem crescendo a utilização de fontes renováveis de energia elétrica, com o objetivo de suprir a crescente demanda e, ao mesmo tempo, diminuir a dependência por combustíveis fósseis, que hoje são a principal fonte de energia no mundo. A matriz elétrica brasileira é predominantemente composta pela geração hidrelétrica, complementada por termelétricas em períodos de baixos índices pluviométricos. Neste cenário, fontes alternativas de energia elétrica, como a solar-fotovoltaica e a eolielétrica, vêm ganhando importância. O Brasil, devido ao seu posicionamento no globo, possui grande potencial para o aproveitamento de energia solar-fotovoltaica, como mostra a Fig. 1.

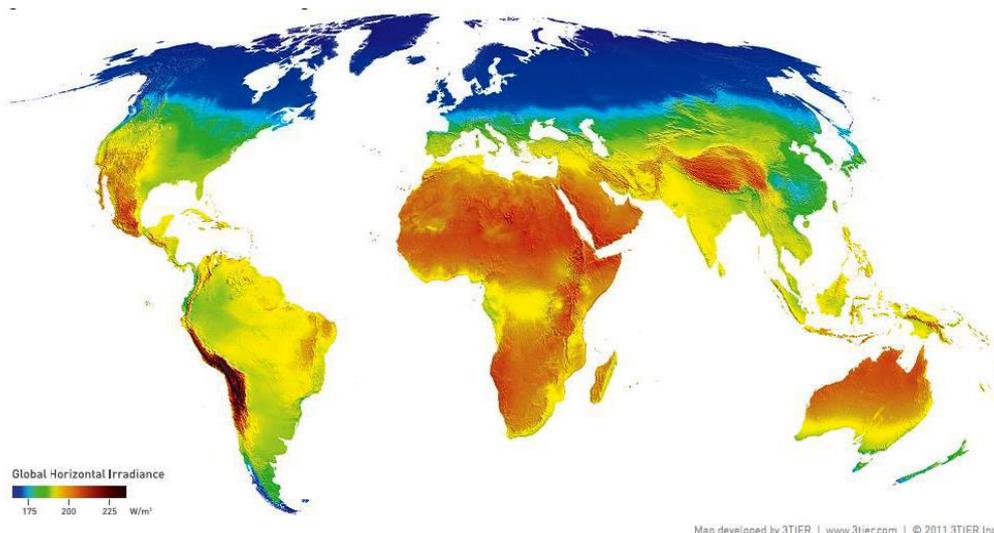


Figura 1- Radiação global (3TIER, 2011).

A energia solar fotovoltaica consiste na conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Essa fonte, via de regra, não pode ser conectada diretamente às cargas, muito menos à rede elétrica, quer seja monofásica ou trifásica, devido às suas variações (comportamento estocástico da radiação solar) e aos seus parâmetros (tensão, corrente, frequência, etc) que normalmente não são adequados ao uso direto. A fim de adequar o

aproveitamento dessa fonte, são utilizados conversores baseados em chaves estáticas, como MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) e IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), por exemplo. Esses conversores são responsáveis por drenar potência elétrica das diversas fontes e processá-la, de modo a disponibilizá-la às cargas c.c. (corrente contínua), para sistemas autônomos, ou à própria rede elétrica de distribuição, para sistemas conectados.

No caso em estudo, um sistema fotovoltaico de 2 kW, que disponibiliza sua energia em um barramento de 311 V_{cc}, cuja tensão é sustentada por um banco de baterias e que alimenta algumas cargas c.c., precisa ser conectado à rede elétrica monofásica de 220 V_{rms}. Uma proposta de conversor é apresentada e suas principais formas de onda, assim como a validação da proposta, são obtidas através de simulação no *software* PSIM. Tal conversor deve possibilitar a injeção de corrente em fase com a tensão da rede (fator de potência próximo à unidade) e com baixo conteúdo harmônico, o que significa um THD (*Total Harmonic Distortion*) menor que 5%. Além disso, deve ser possível drenar potência da rede, a fim de alimentar as cargas c.c. e carregar o banco de baterias quando as fontes fotovoltaicas não tiverem condições de suprir energia suficiente.

O objetivo do presente trabalho é apresentar uma proposta de conversor c.c.-c.a. para interligar o sistema fotovoltaico citado à rede elétrica monofásica, atuando com correção de fator de potência.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

2.1 Sistema proposto

O Sistema em estudo é uma microrede inteligente que alimenta cargas em c.c. e em c.a., e é projetado para processar uma potência ativa de 2 kW. É composto por cinco subsistemas:

- Subsistema de geração fotovoltaica, composto por dez módulos c.c., cada um contendo um painel fotovoltaico de 200 W_p e um conversor c.c.-c.c. para a busca do ponto de máxima potência (*MPPT*);
- Subsistema de banco de baterias, que compreende um conjunto para armazenamento de energia, cuja tensão de operação é de 48 V_{cc};
- Subsistema controlador de carga, responsável pelo controle do fluxo de energia entre o barramento de 311 V_{cc} (saída dos módulos c.c.) e o banco de baterias;
- Subsistema de cargas c.c., diretamente conectadas ao barramento c.c.; e
- Subsistema de conversão c.c.-c.a., responsável pela interligação do sistema fotovoltaico à rede elétrica monofásica de 220 V_{rms}.

O sistema completo, com seus diversos subsistemas, pode ser observado na Fig. 2.

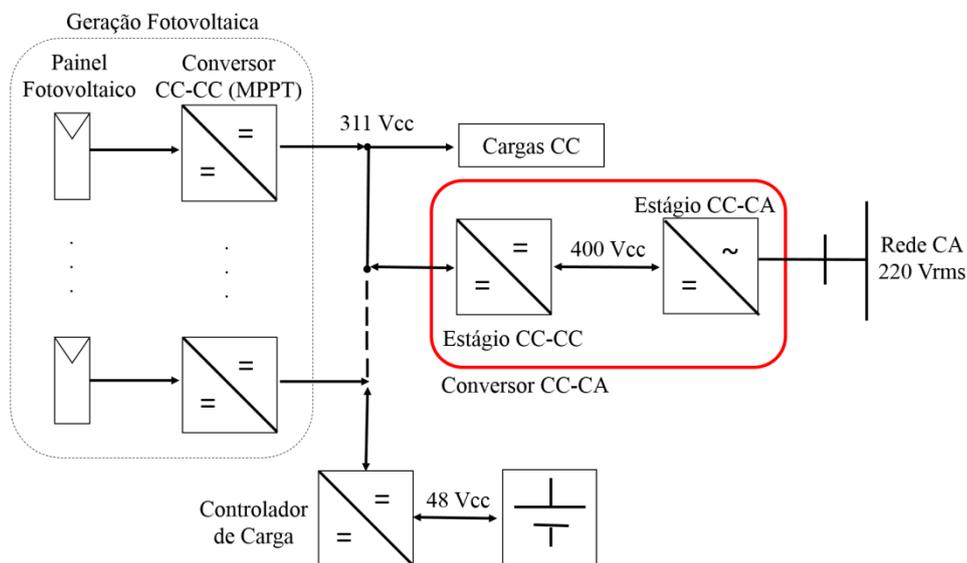


Figura 2 – Representação do sistema fotovoltaico em estudo (Adaptado de Ximenes, 2012).

2.2 Subsistema-objeto

O subsistema que será abordado neste artigo trata-se do conversor c.c.-c.a. (em destaque na Fig. 2), que possui dois estágios de processamento de energia, quais sejam: um conversor c.c.-c.c. elevador (*Boost*), que eleva a tensão do barramento c.c. (311 V_{cc}) para cerca de 400 V_{cc}, e um conversor c.c.-c.a., que “inverte” essa tensão e injeta corrente na rede com baixa distorção (THD < 5%) e com alto fator de potência (maior que 0,98).

Este subsistema também deve ser capaz de absorver potência da rede, com a finalidade de alimentar as cargas c.c. e carregar o banco de baterias, quando as fontes fotovoltaicas não tiverem condições de suprir energia suficiente para esse fim. Neste caso, o conversor c.c.-c.a. atuará como retificador *boost* e o conversor c.c.-c.c. funcionará como um abaixador (*Buck*).

2.3 Conversor Boost

O conversor *Boost* clássico é apresentado na Fig. 3.

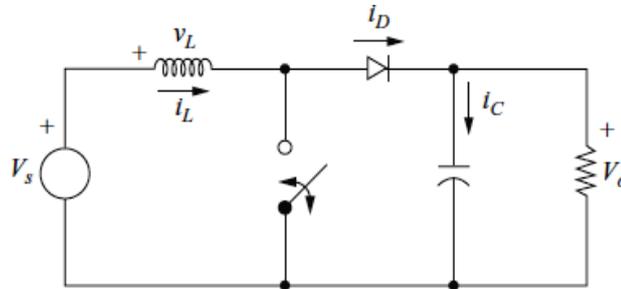


Figura 3 – Conversor *Boost* (Hart, 2011).

Quando a chave está fechada, uma tensão positiva é aplicada aos terminais do indutor, que passa a acumular energia na forma de corrente. Quando a chave é aberta, a tensão em seus terminais se torna negativa e a energia armazenada é descarregada na carga.

A relação entre as tensões c.c. de saída (V_o) e de entrada (V_s) é dada pela Eq. (1).

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

em que D é a taxa de trabalho da chave estática.

Esta relação não considera possíveis não idealidades (como resistência interna no indutor ou queda de tensão no diodo, por exemplo) do indutor. O capacitor funciona como filtro para a tensão entregue à carga e esta terá maior ou menor oscilação de acordo com o valor da capacitância escolhido.

Este conversor, tal como apresentado na Fig. 3, é unidirecional, ou seja, a potência só flui da fonte (à esquerda) para a carga (à direita), devido à presença do diodo. Em aplicações em que se deseja a conexão com a rede elétrica e, mais que isso, a possibilidade de obter energia desta rede, com potência fluindo no sentido contrário, faz-se necessária a utilização de um conversor bidirecional. Neste caso, basta substituir o diodo por uma chave estática, que operará em modo complementar em relação à chave principal (taxa de trabalho de $1-D$).

2.4 Conversor c.c.-c.a.

O conversor c.c.-c.a. mais simples e utilizado para sistemas fotovoltaicos (conversor ponte completa monofásico) é apresentado na Fig. 4.

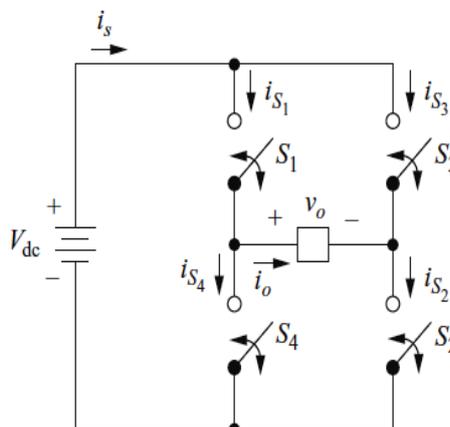


Figura 4 – Conversor Ponte Completa Monofásico (Hart, 2011).

Em sua entrada, há uma fonte de tensão o alimentando. Quando as chaves S1 e S2 estão fechadas (S3 e S4 estão abertas), a tensão $+V_{dc}$ é aplicada aos terminais da carga (V_o). Quando as chaves S3 e S4 estão fechadas (S1 e S2 estão abertas), a tensão $-V_{dc}$ é aplicada aos terminais da carga (V_o). Quando S1 e S3 estão fechadas (e S2 e S4 abertas) ou quando S2 e S4 estão fechadas (e S1 e S3 abertas), a tensão na saída é nula.

É importante observar que as chaves S1 e S4 operam de modo complementar, ou seja, não podem estar fechadas ao mesmo tempo (caso isso ocorra, fechar-se-á um curto-circuito nos terminais da fonte). O mesmo vale para S2 e S3.

Enxergando-se os ramos em que se encontram os pares de chaves S1/S4 e S2/S3 como “braços” do conversor, pode-se dizer que as chaves de um mesmo “braço” não podem estar fechadas simultaneamente.

Dependendo da técnica de modulação adotada, a tensão V_o terá comportamentos diferentes. Por exemplo, se a técnica for trabalhar com uma taxa de trabalho fixa de 0,5 para cada chave (cada chave é fechada por 50% do tempo e nos outros 50% fica aberta), V_o apresentará a forma de onda mostrada na Fig. 5.

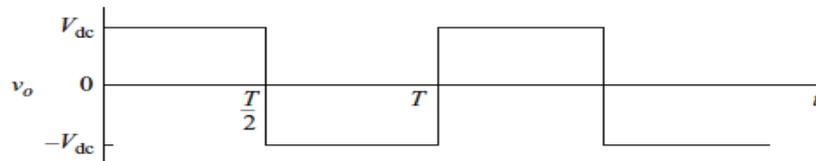


Figura 5 – Forma de onda da tensão de saída do conversor c.c.-c.a. (Hart, 2011).

Como se pode observar, essa forma de onda não é senoidal e possui um conteúdo harmônico muito alto. É útil para alimentação de algumas cargas específicas, mas para as cargas c.a. de modo geral, ela não é adequada.

Para reduzir essa distorção harmônica e aproximar essa forma de onda de uma senoide pura, pode-se utilizar a técnica de SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*), em que o acionamento das chaves é feito a partir da comparação de uma referência senoidal (moduladora) com uma onda triangular em alta frequência (normalmente a partir de 20 kHz), como mostra a Fig. 6.

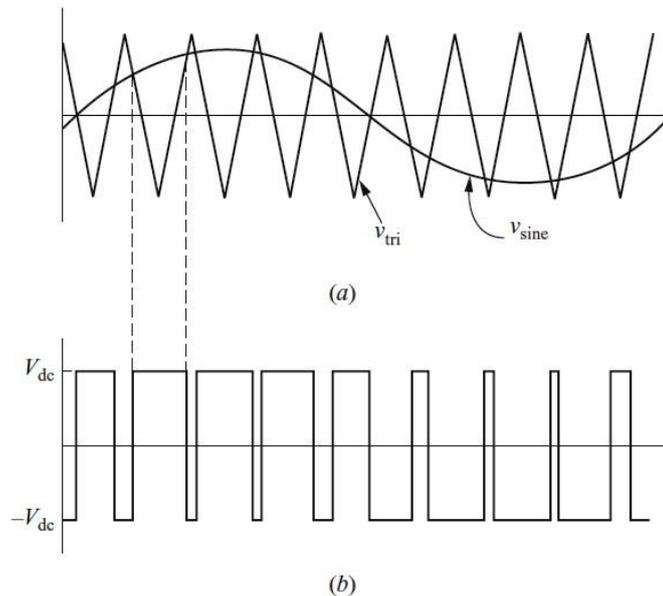


Figura 6 – (a) SPWM bipolar e (b) Forma de onda da tensão de saída (Hart, 2011).

Essa forma de onda também não é senoidal e também possui um conteúdo harmônico muito elevado, porém os harmônicos de ordem mais baixa aparecem em torno da frequência de chaveamento (da onda triangular) e, como estão muito distantes da frequência fundamental (50 ou 60 Hz), podem facilmente ser filtradas com filtros passivos (associações de capacitores, indutores e resistores) relativamente pequenos.

Este mesmo conversor, com as adaptações necessárias, pode operar como retificador, com potência fluindo no fluxo oposto (do lado c.a. pro lado c.c.). Tais adaptações consistem basicamente na utilização de diodos em antiparalelo com as chaves e na colocação de um capacitor devidamente dimensionado no lado c.c. para filtrar a tensão, diminuindo a oscilação em torno de seu valor médio (*ripple*).

3. ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

Para projetar o conversor proposto, com os dois estágios, o de elevação c.c.-c.c. e o c.c.-c.a., considerou-se os parâmetros apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 – Especificações de projeto.

PARÂMETRO	VALOR / UNIDADE
Tensão do barramento c.c. (V_s)	311 V _{cc}
Tensão da rede monofásica (V_{rede})	220 V _{rms}
Frequência da rede monofásica (f)	60 Hz
Tensão no <i>link</i> c.c. (V_c)	400 V _{cc}
Frequência de chaveamento das chaves (f_s)	21 kHz
Potência ativa nominal dos conversores (P)	2 kW
Oscilação na tensão do <i>link</i> c.c. (ΔV_c)	2% . V_c
Oscilação máxima de corrente no indutor do filtro L (ΔI_{Lmax})	10% . I_{Lpico}
Oscilação máxima de corrente no indutor do <i>Boost</i> (ΔI_{Lb})	50% . I_{Lbmed}

Com tais definições, calcularam-se os demais parâmetros para o conversor *Boost* através das Eqs. (2) a (4) (Martins e Barbi, 2008):

$$I_{Lbmed} = \frac{P}{V_s} \quad (2)$$

$$D_b = 1 - \frac{V_s}{V_c} \quad (3)$$

$$L_b \geq \frac{V_s \cdot D_b}{\Delta I_{Lb} \cdot f_s} \quad (4)$$

Para o conversor c.c.-c.a., calculou-se os seguintes parâmetros apresentados nas Eqs. (5) a (7) (Neto *et al.*, 2013):

$$I_{Lpico} = \frac{2 \cdot P}{V_{rede} \cdot \sqrt{2}} \quad (5)$$

$$L_f \geq \frac{0,25 \cdot V_c}{2 \cdot \Delta I_{Lmax} \cdot f_s} \quad (6)$$

$$C_{lk} \geq \frac{P_o}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta V_c \cdot V_c} \quad (7)$$

Os resultados das Eqs (2) a (7) são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Valores calculados.

PARÂMETRO	VALOR / UNIDADE
Corrente média no indutor do <i>Boost</i> (I_{Lbmed})	6,43 A
Taxa de trabalho nominal da chave principal do <i>Boost</i> (D_b)	0,2225
Indutância do <i>Boost</i> (L_b)	1,02 mH
Pico da corrente no indutor do filtro L (I_{Lpico})	12,86 A
Indutância do filtro L (L_f)	1,85 mH
Capacitância do <i>link</i> c.c. (C_{lk})	1,66 mF

Adotou-se como valor de indutância do *Boost* o valor de 1,00 mH, para a indutância do filtro L o valor de 2,00 mH e para a capacitância do *link* c.c. o valor de 1,88 mF. Para as chaves, optou-se pela utilização de IGBT's.

4. CONTROLE

Foi adotado o controle analógico com a utilização de controladores PI (proporcional-integral). Atribuiu-se ao conversor c.c.-c.a. o controle da corrente injetada na (ou absorvida da) rede elétrica, assim como da tensão no *link* c.c..

Ao conversor c.c.-c.c. coube controlar a corrente drenada da (ou injetada na) fonte c.c. (barramento de 311 V_{cc}). Optou-se por atribuir a outro conversor, que não é objeto do presente trabalho, a tarefa de controlar a tensão no barramento c.c.. Para tanto, escolheu-se: para a malha de corrente do conversor c.c.-c.a., uma frequência de cruzamento de metade de f_s (10,5 kHz); para a malha de tensão do mesmo conversor, uma frequência de cruzamento de 15 Hz; e para a malha de corrente do conversor c.c.-c.c., uma frequência de cruzamento de um quarto de f_s (5,25 kHz).

O objetivo principal da estratégia de controle adotada é injetar na (ou drenar da) rede elétrica uma corrente em fase com a tensão e com baixa distorção harmônica, ou seja, com fator de potência próximo à unidade e THD < 5%.

5. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Para validar a estratégia de controle adotada, simulou-se o subsistema-objeto em dois modos: injetando potência elétrica na rede e drenando potência da rede. No primeiro modo, o conversor c.c.-c.c. atua como um *Boost*, elevando a tensão de 311 V_{cc} para 400 V_{cc}, e o conversor c.c.-c.a. atua como inversor, gerando tensão e corrente alternada. No segundo modo, o conversor c.c.-c.a. atua como um retificador *boost*, retificando e elevando a tensão da rede, cujo pico é de 311 V, para 400 V_{cc}, e o conversor c.c.-c.c. atua como um *Buck* (conversor abaixador), baixando de 400 V_{cc} para 311 V_{cc}, que alimenta o barramento c.c..

A Fig. 7 apresenta um esquemático do circuito de potência no *software* PSIM.

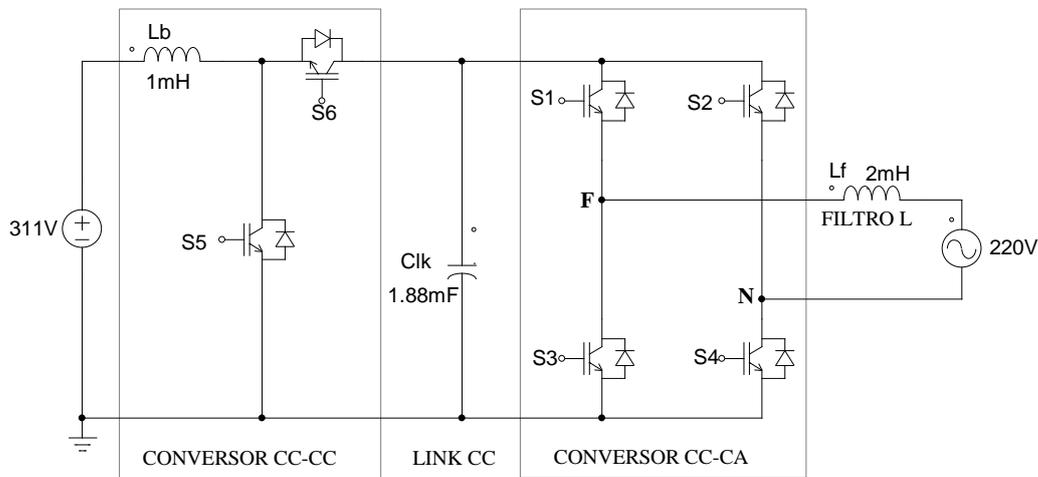


Figura 7 – Esquemático do circuito de potência.

Simulando a injeção de potência na rede elétrica (entre os instantes 0,95 s e 1,00 s), obtém-se a Fig. 8.

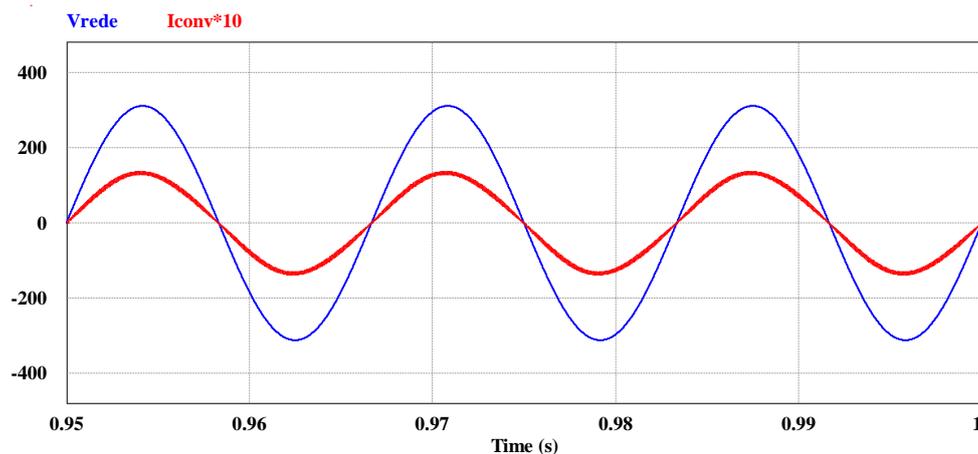


Figura 8 – Tensão da rede monofásica (V_{rede}) e corrente injetada na rede (I_{conv}).

Observa-se que a corrente (multiplicada por 10) está em fase com a tensão da rede. Utilizando-se o próprio *software* para cálculo do THD da corrente, do fator de potência e da potência injetada, obtém-se 3,78%, 0,999 e 2,036 kW, respectivamente.

A Fig. 9 mostra a tensão da fonte c.c. e a tensão no capacitor do link c.c..

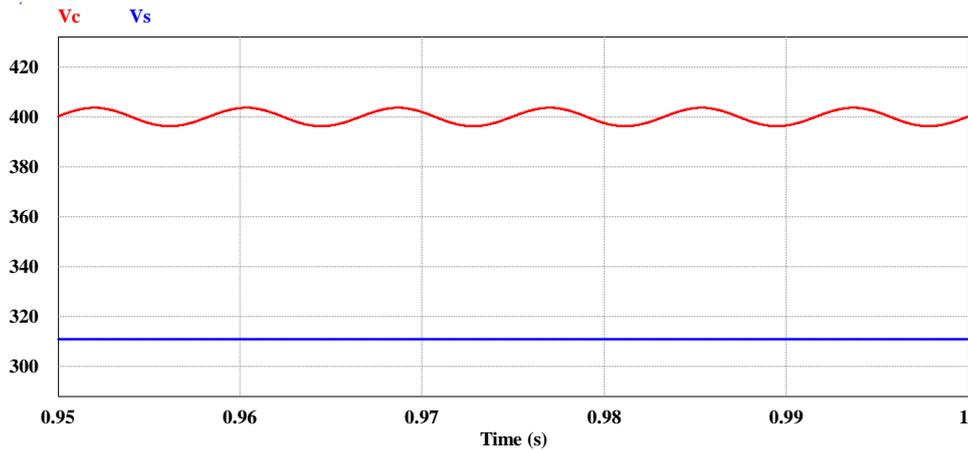


Figura 9 – Tensão da fonte c.c. (V_s) e a tensão no capacitor do link c.c. (V_c).

A oscilação de tensão no *link* c.c. é de 1,9%, sobre um valor médio de 400 V_{cc} . Além disso, a componente c.a. da tensão no capacitor possui o dobro da frequência da rede, ou seja, oscila a 120 Hz.

A Fig. 10 mostra a corrente no indutor do conversor c.c.-c.c..

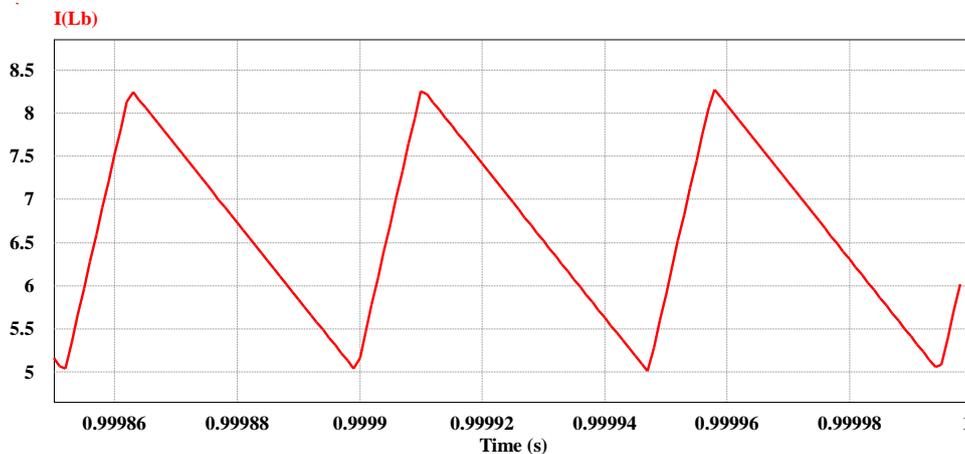


Figura 10 – Corrente através do indutor do conversor c.c.-c.c. (I_{Lb}).

Tal corrente é drenada da fonte c.c. para ser injetado na rede. Seu valor médio é de 6,6 A, o que indica que ela flui da fonte c.c. para a rede, com oscilação é de 49,6%.

Simulando a absorção de potência da rede elétrica (entre os instantes 0,95 s e 1,00 s), obtêm-se as formas de onda para tensão e corrente da rede elétrica, como mostrado na Fig. 11.

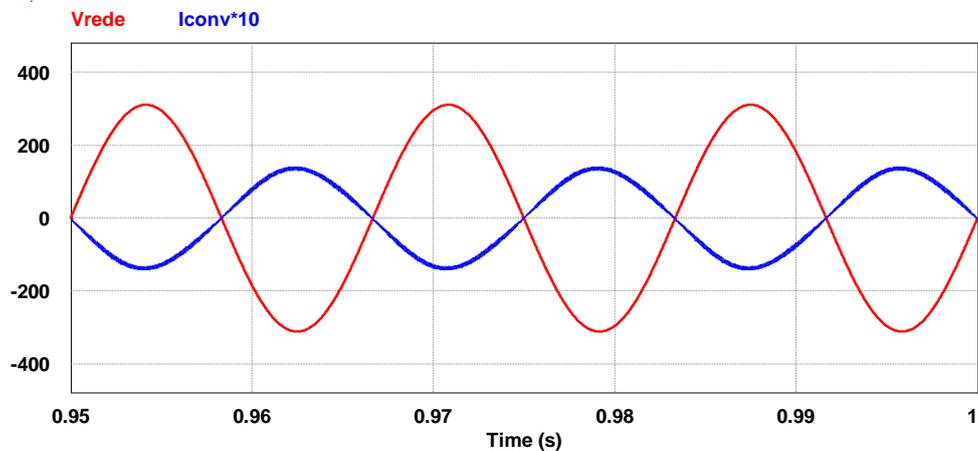


Figura 11 – Tensão da rede monofásica (V_{rede}) e corrente injetada na rede (I_{conv}).

Observa-se que a corrente (multiplicada por 10) está em oposição de fase (defasada de 180°) em relação à tensão da rede. Utilizando-se o próprio software para cálculo do THD da corrente, do fator de potência e da potência injetada, obtém-se 3,67%, -0,999 e -2,088 kW, respectivamente.

A Fig. 12 mostra a tensão da fonte c.c. e a tensão no capacitor do link c.c. para este fluxo de potência contrário.

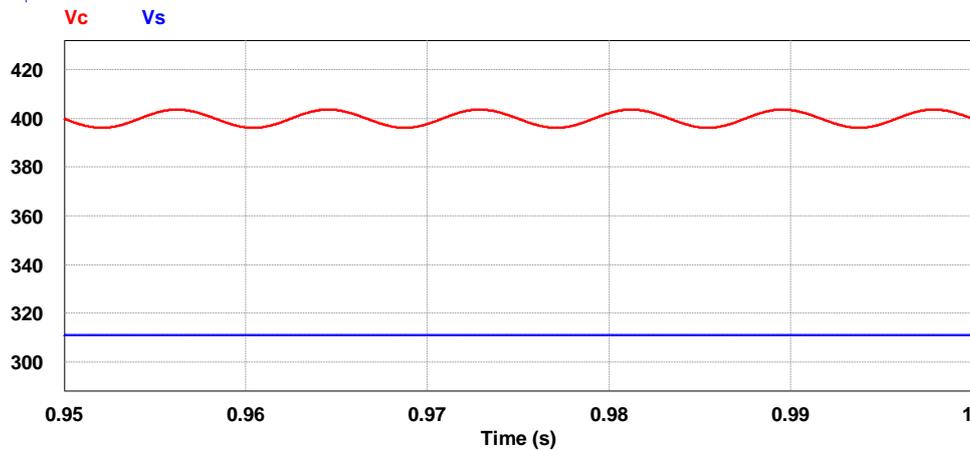


Figura 12 – Tensão da fonte c.c. (V_s) e a tensão no capacitor do link c.c. (V_c).

A oscilação de tensão no *link* c.c., neste caso, também é de 1,9%, sobre um valor médio de $400 V_{cc}$, com oscilação em 120 Hz.

Enfim, a Fig. 13 mostra a corrente no indutor do conversor c.c.-c.c..

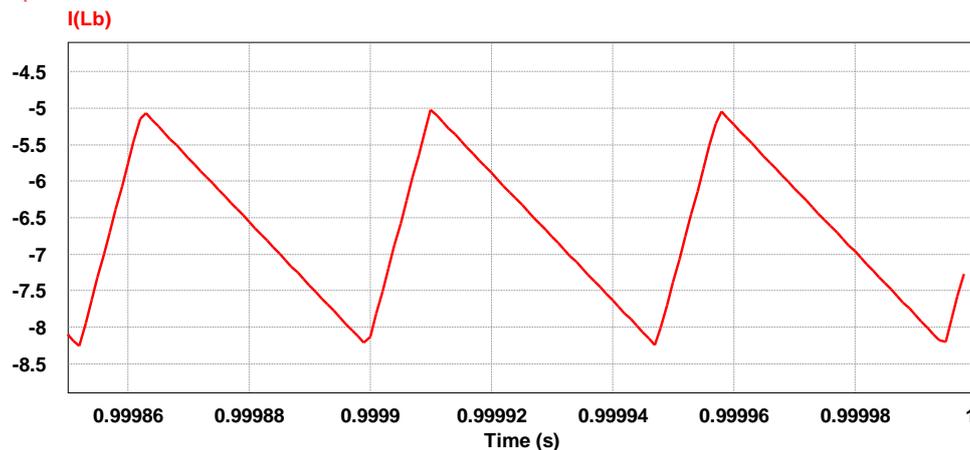


Figura 13 – Corrente através do indutor do conversor c.c.-c.c. (I_{Lb}).

O valor médio dessa corrente é de -6,7 A, indicando que ela flui da rede c.a. para a fonte c.c., ou seja, é essa corrente que está sendo injetada na fonte c.c.. Sua oscilação é de 48,2%.

Analisando-se as Figs. 8 a 13 e comparando-as com a Tab. 1, observa-se o atendimento das especificações do projeto, especialmente quanto ao limite de THD, às oscilações da tensão do *link* c.c. e da corrente no indutor do *Boost*.

6. CONCLUSÃO

O projeto de conversor c.c.-c.a. para conexão de um sistema fotovoltaico à rede elétrica apresentou bons resultados e teve seus objetivos alcançados. Por meio deste estudo, foi possível entender a importância dos conversores c.c.-c.a. para interligação das fontes fotovoltaicas à rede elétrica.

Ficou comprovado, por meio da simulação, que, com a estratégia de controle aplicada, foi possível controlar o fluxo de potência (injetada ou retirada) e modular a corrente no ponto de conexão com a rede elétrica.

A distorção harmônica total foi menor que o limite de 5%, tanto na injeção quanto na absorção de potência da rede. O fator de potência também apresentou valores bastante adequados, muito próximos da unidade (negativo, no caso da absorção). A tensão no link C.C. também apresentou o comportamento previsto nas especificações, oscilando menos que 2% do seu valor médio.

REFERÊNCIAS

- 3TIER. Global Mean Solar Irradiance, 2011. Disponível em:
<http://www.3tier.com/static/ttcms/us/images/support/maps/3tiersolarirradiance.pdf>. Acessado em 27 de outubro de 2013.
- Barbi, I., Martins, D. C. 2008. Eletrônica de potência: Conversores C.C.-C.C. básicos não isolados. 377p. 3ª edição, Florianópolis-SC, Edição dos autores.
- Hart, D. W. 2011. *Power Electronics*. 477p. New York-NY, McGraw-Hill Inc.
- Neto, J. A. F., Brito Jr, F. J. B., Joca, D. R., Nunes, M. A. N., Torrico-Bascopé, R. P. 2013. A five-level NPC bidirectional converter based on multi-state switching cell operating as boost rectifier. Gramado – RS, XII COBEP – Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência.
- Ximenes, S. C. 2012. Projeto de um conversor c.c.-c.a. trifásico para interligar um sistema fotovoltaico à rede elétrica. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza-CE.

DESIGN AND SIMULATION OF A SINGLE PHASE DC-AC CONVERTER FOR CONNECTION OF A PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM TO THE ELECTRICAL GRID

Abstract. *In recent years, photovoltaic energy sources are becoming increasingly competitive, making its participation in the energy matrix of power systems presents a strong growth. Such expectation has resulted in a significant increase on the number of grid-connected systems. For connection to power grid, it is essential to use a dc-ac converter, which is able to suit the characteristics of the power provided by the photovoltaic modules to grid parameters. This paper presents a project proposal of a 2 kW single phase dc-ac converter for connecting a photovoltaic conversion system to a 220 Vrms single-phase grid, to enable a unitary power factor, low harmonic content current injection, in addition to power absorption, in order to feed the dc loads and charge a battery bank when the photovoltaic sources are not able to supply enough energy. The study shows that, with the application of an appropriate control strategy, it is possible to control the direction of power flow of the converter, and appropriately modulating the current injected or absorbed from the grid.*

Key words: *Photovoltaic generation, Static converter, Inverter, Grid connection.*