

CONVERSOR PARA INTERLIGAÇÃO DE SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO À REDE ELÉTRICA

Heron Alves dos Santos – santos.heron@gmail.com
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica
Tatiane Carlyne Carneiro – tatiane.carolyne@ufma.br
Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Ciência e Tecnologia
Fernando Luiz Marcelo Antunes – fantunes@dee.ufc.br
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. A recente expectativa de crescimento da participação da energia solar-fotovoltaica na matriz de geração de energia elétrica aumentou significativamente o número de conexões 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. Este artigo apresenta um conversor c.c./c.a. de 2 kW para conexão de um sistema de geração fotovoltaico à rede elétrica. O estudo realizado mostra que é possível controlar o sentido do fluxo de potência do conversor, assim como modular apropriadamente a corrente que flui para a rede elétrica. O protótipo desenvolvido apresentou rendimento de cerca de 91% e forneceu corrente elétrica de baixo conteúdo harmônico.

Palavras-chave: Geração Fotovoltaica, Conversores Estáticos, Conexão à Rede.

1. INTRODUÇÃO

As fontes renováveis de energia têm conquistado grande espaço na matriz energética mundial. Tal avanço tem como causa diversos fatores, dentre os quais a crescente demanda energética mundial, a perspectiva de escassez de recursos oriundos de fontes fósseis e o esforço internacional para diminuir a emissão de gases nocivos ao meio ambiente, responsáveis pelos chamados efeito estufa e aquecimento global (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2013). A energia solar e a eólica vêm ganhando importância significativa, em nível mundial, na produção de energia elétrica. Essas fontes são de particular interesse para o Brasil, dada a abundância desses recursos em diversas regiões do nosso território. Essas fontes possuem características que impedem seu aproveitamento direto.

Devido à natureza particular da forma através da qual geram energia elétrica, tanto geradores eolielétricos quanto geradores solares-fotovoltaicos não podem ser conectados diretamente à maioria das cargas elétricas, e muito menos à rede elétrica das concessionárias distribuidoras de energia. Isso se deve às variações inerentes a essas fontes (intermitência) e aos seus parâmetros elétricos (tensão, corrente, etc.), que geralmente não são adequados para uso direto (SANTOS; DIAS JÚNIOR; ANTUNES, 2014). Para resolver a questão de condicionamento da energia gerada, possibilitando o aproveitamento eficiente dessas fontes, conversores eletrônicos de potência, baseados no uso de chaves eletrônicas estáticas, têm sido utilizados. Tais conversores são responsáveis, então, pelo processamento da potência elétrica fornecida por diversas fontes, a fim de torná-la condicionada à alimentação de cargas e à conexão à rede elétrica de distribuição.

Neste contexto de utilização das fontes renováveis de energia, o objetivo deste trabalho é apresentar um conversor c.c./c.a. bidirecional, para interligar um barramento c.c. em 311 V a um c.a. em 220 V, partes integrantes de um sistema fotovoltaico de pequeno porte (2 kWp), adequado a aplicações em microrredes e em geração distribuída.

2. APROVEITAMENTO SOLAR-FOTOVOLTAICO NO BRASIL

Recentemente, grandes esforços têm sido direcionados ao aproveitamento da energia solar no Brasil, particularmente por meio de sistemas fotovoltaicos de geração de eletricidade, visando ao atendimento de comunidades isoladas da rede de energia elétrica e ao desenvolvimento regional (MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE, 2014). Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (2015), há 31 centrais geradoras solares fotovoltaicas em operação no país, representando uma potência instalada de 21.318 kW.

Existe uma infinidade de pequenos projetos nacionais de conversão fotovoltaica, principalmente para o suprimento de eletricidade em comunidades isoladas do Norte e Nordeste do país. Esses projetos fotovoltaicos dividem-se em diferentes categorias: a) Bombeamento de água; b) Abastecimento doméstico; c) Irrigação e piscicultura; d) Iluminação pública; e) Eletrificação de escolas, postos de saúde e centros comunitários; e f) Sistemas de telecomunicações.

O ano de 2012 foi importante na área de procedimentos de regulamentação. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) por meio da resolução 482, publicada em abril de 2012, dá condições gerais para o acesso de microgeração (até 100 kW) e mini-geração (a partir de 100 kW até 1MW) à rede de distribuição.

A microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 quilowatts (kW) e a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 megawatt (MW).

Em abril de 2012, foi homologada pela ANEEL a Resolução Normativa nº 482, que define os conceitos de microgeração (≤ 100 KW) e minigeração (≤ 1 MW) distribuída e o sistema de compensação de energia. Essa resolução regulamentava e viabilizava a conexão de sistemas fotovoltaicos de pequeno porte à rede de distribuição, o que permitia ao consumidor cativo instalar pequenos geradores em sua propriedade e trocar energia com a distribuidora local.

Especificamente para a geração solar-fotovoltaica, foi publicada a Resolução Normativa nº 481, de 17/04/2012, pela qual ficou estipulado um desconto de 80% (oitenta por cento) nas tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição aos empreendimentos solares com potência injetada nos sistemas de transmissão ou distribuição menor ou igual a 30 MW, que entrem em operação comercial até 31/12/2017. Esse desconto será aplicável nos 10 (dez) primeiros anos de operação. Findo este período, o desconto será reduzido para 50% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2012).

Porém, painéis e módulos fotovoltaicos não podem ser conectados diretamente à rede elétrica, necessitando de conversores eletrônicos de potência para processar a potência gerada e torná-la compatível e aceitável para os diferentes tipos de cargas e, especialmente, para a rede elétrica.

3. CONVERSÃO SOLAR-FOTOVOLTAICA

O processo de conversão solar-fotovoltaica consiste na transformação da energia contida na radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. Essa fonte, via de regra, não pode ser conectada diretamente às cargas ou à rede elétrica, quer seja monofásica ou trifásica, devido principalmente aos seus parâmetros elétricos (tensão, corrente, etc.), que não permitem seu uso direto. A fim de adequar o aproveitamento da fonte solar-fotovoltaica, são utilizados conversores baseados em chaves eletrônicas estáticas, como o 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 diretamente às cargas, no caso de sistemas autônomos, ou à rede elétrica de distribuição, no caso de sistemas conectados (SANTOS, 2014).

3.1 Conversor c.c./c.c. Boost

O conversor *Boost* clássico é apresentado na Fig. 1. Ele é composto, basicamente, por um indutor (responsável pelo armazenamento de energia), uma chave estática (MOSFET, IGBT, etc.), um diodo e um capacitor (responsável por diminuir as oscilações de tensão sobre a carga). Quando a chave está fechada (Fig. 1 b), uma tensão positiva é aplicada aos terminais do indutor, que passa a acumular energia. Quando a chave é aberta (Fig. 1 c), a tensão em seus terminais torna-se negativa e a energia armazenada é descarregada na carga.

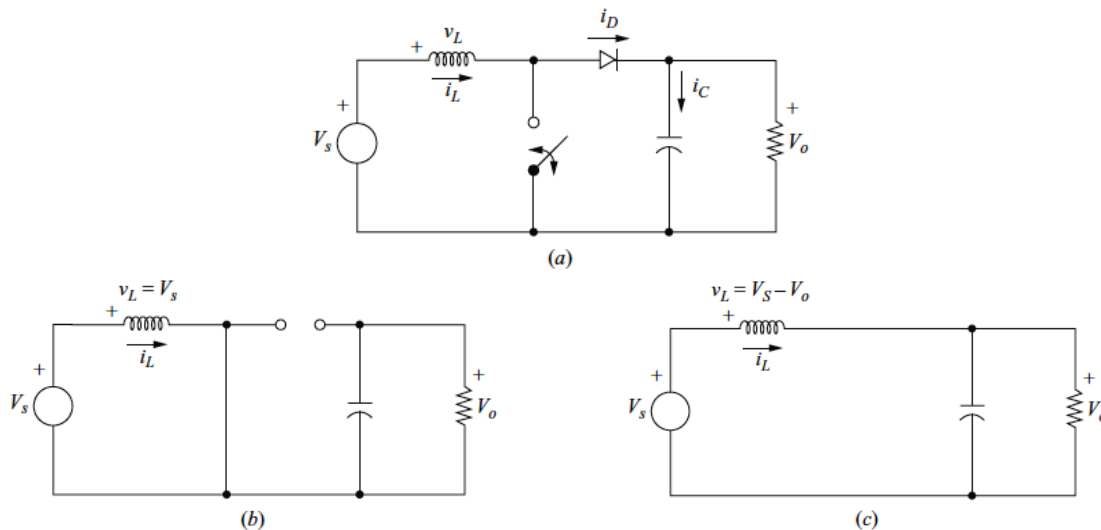


Figura 1 – (a) Conversor *Boost*. Circuito equivalente: (b) chave fechada e (c) para chave aberta. Fonte: Hart (2011).

A relação entre as tensões c.c. de saída (V_o) e de entrada (V_s) (ganho estático) é dada pela Eq. 1, onde D (duty cycle) é a razão cíclica da chave estática ativa.

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

Dentre as topologias de conversor c.c./c.c. que se aplicam à necessidade de elevar uma tensão de um barramento c.c. de 311 V para 400 V, o conversor *Boost* clássico apresenta as seguintes vantagens básicas:

- Possui menor número de componentes, proporcionando de baixo custo para sua construção;
- Apresenta menores perdas, pelo fato de a corrente circular por um menor número de chaves;
- Não possui transformador, elemento que, mesmo operando em frequências mais elevadas, tende a contribuir de forma significativa para o aumento das perdas por dissipação de energia; e

d) Permite o fluxo de potência em sentido reverso (neste caso, opera como *Buck*), possibilitando a bidirecionalidade (os demais necessitariam de modificações mais profundas que a simples substituição de um diodo por uma chave ativa).

Segundo Pomílio (2007), o conversor *Boost* possui, adicionalmente, as seguintes vantagens:

- Exigência menor de filtros IEM (interferência eletromagnética), devido ao fato de a corrente de entrada não ser interrompida, no modo de condução contínua; e
- A chave (principal) é submetida a uma tensão igual à tensão de saída e seu acionamento é simples, podendo ser realizado por um sinal de baixa tensão referenciado ao terra;
- O capacitor de filtro opera em tensão mais elevada, permitindo que se adote capacitâncias menores.

No entanto, a maior desvantagem do uso do conversor *Boost* é o fato de ele não ser isolado, ou seja, a entrada (fonte) e a saída (carga) têm o mesmo referencial e estão conectadas física e eletricamente, ou seja, se a fonte estiver aterrada, o mesmo referencial será adotado pela carga na saída do conversor. Porém, em países onde a legislação para conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica permite que o conversor utilizado seja não-isolado, como é o caso do Brasil, em que não há restrição quanto a esta característica, o conversor *Boost* se apresenta como a opção mais prática, viável e eficiente para elevação de tensão c.c. (XIMENES, 2012).

3.2 Conversor c.c./c.a. Ponte Completa

O conversor c.c./c.a. mais utilizado em sistemas fotovoltaicos, devido a sua simplicidade e facilidade de operação, o conversor ponte completa monofásico, é apresentado na Fig. 2.

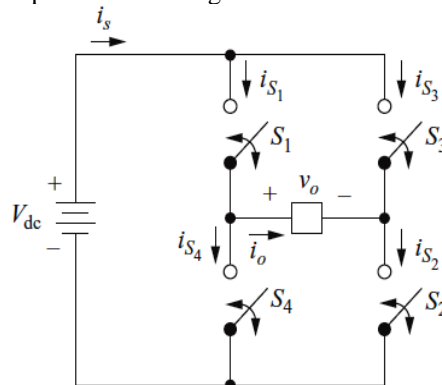


Figura 2 – Conversor Ponte Completa Monofásico. Fonte: Hart (2011).

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 + Vdc é aplicada aos terminais da carga (Vo). Quando as chaves S3 e S4 estão fechadas (S1 e S2 estão abertas), a tensão - Vdc é aplicada aos terminais da carga (Vo). 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. Em outras palavras, 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 ser fechadas simultaneamente.

Dentre as topologias de conversor c.c./c.a. que se aplicam à necessidade de converter uma tensão c.c. de 400 V em uma tensão c.a. de 220 V_{rms}, o conversor c.c./c.a. ponte completa apresenta as seguintes vantagens básicas:

- Possui baixo custo para sua construção (apesar de não ser o que apresenta o menor número de componentes);
- Tende a apresentar um nível de perdas aceitável, pelo fato de a corrente circular, em cada etapa, por, no máximo, duas chaves;
- É uma topologia simples e bastante utilizada; e
- A lógica de acionamento das chaves é relativamente fácil e já consagrada, com diversos *drivers* (circuitos de acionamento) desenvolvidos para esta finalidade.

4. SISTEMA PROPOSTO E METODOLOGIA

O sistema proposto é uma microrrede que alimenta cargas c.c. e c.a., e é composto por cinco subsistemas:

- Subsistema de conversão fotovoltaica, formado por dez módulos c.c., cada um contendo um painel fotovoltaico de 200 Wp e um conversor c.c./c.c. para a rastreamento 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};

- c) 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;
- d) Subsistema de cargas c.c., diretamente conectadas ao barramento c.c.; e
- e) Subsistema de conversão c.c./c.a., responsável pela interligação dos dois barramentos da microrrede, um c.c., de 311 V, e um c.a., de 220 V_{rms}.

O sistema completo, com seus diversos subsistemas, pode ser observado na Fig. 3.

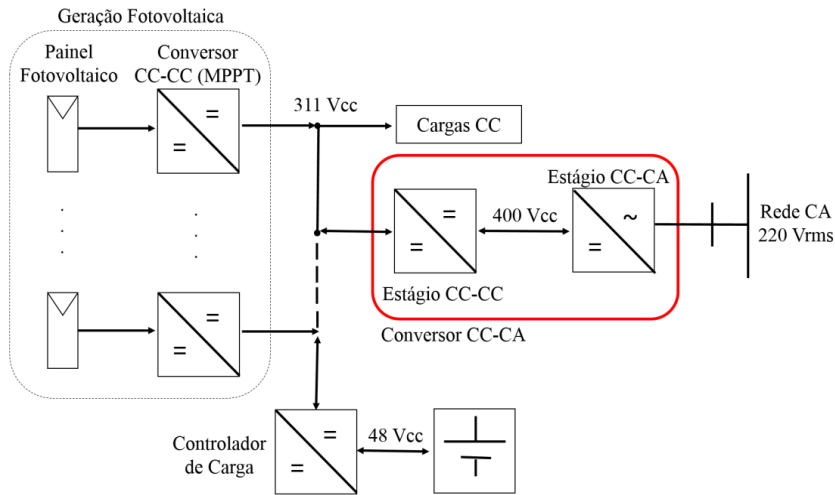


Figura 3 – Representação do sistema fotovoltaico proposto. Fonte: Adaptado de Ximenes (2012).

O escopo deste trabalho é implementar este último subsistema, o de conversão c.c./c.a.. Cabe ressaltar que uma potência de 2 kW é suficiente para alimentação de pequenas cargas residenciais, como circuitos de iluminação e de tomadas de uso geral. No que diz respeito às tensões adotadas, 311 V_{cc} é bastante comum para alimentação de cargas c.c. em microrredes e 220 V_{rms} é a tensão padrão de distribuição secundária adotada pela maioria das concessionárias.

O subsistema que será abordado neste trabalho é o conversor c.c./c.a. em destaque na Fig. 3, 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 fornece corrente ao barramento c.a., com baixa distorção harmônica total (THDi < 5%) e com alto fator de potência (maior que 0,94). Tal subsistema pode ser observado com maiores detalhes na Fig. 4.

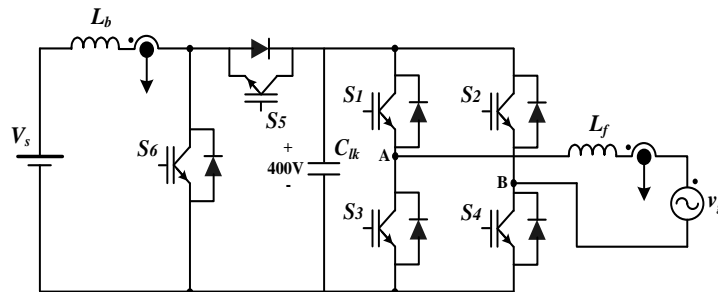


Figura 4 – Subsistema composto por dois conversores em cascata. Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1 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_g)	220 V _{rms}
Tensão no link c.c. (V_c)	400 V _{cc}
Frequência de chaveamento (f_s)	21 kHz
Potência ativa nominal dos conversores (P)	2 kW
Ondulação na tensão do link c.c. (ΔV_c)	2% . V_c
Ondulação máxima de corrente no indutor do filtro L (ΔI_{Lmax})	10% . I_{Lpico}
Ondulação máxima de corrente no indutor do Boost (ΔI_{Lb})	50% . I_{Lbmed}
Rendimento global aproximado	92%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Sobre os valores adotados para os parâmetros contidos na Tab. 1, cumpre destacar que alguns são fixos (impostos pelo próprio sistema e/ou pelo gestor do sistema), tais como a tensão do barramento c.c. (V_s), a tensão da rede monofásica (V_g), a frequência da rede e a potência ativa nominal dos conversores (P), enquanto os demais são variáveis e dependem do projeto.

A tensão no link c.c. (V_c), por exemplo, depende, basicamente, da tensão de pico da rede, que neste caso é de 311 V. Assim, essa tensão c.c. não pode ser menor que o pico da rede. Como o conversor c.c./c.a., atuando com inversor fonte de tensão (VSI), tem características de um conversor Buck, normalmente se adota para o link c.c. uma tensão, no mínimo, 20% maior que a tensão de pico da rede. Assim, adotou-se o valor de 400 V (28,6% maior) para este parâmetro.

Já a frequência de chaveamento (f_s) precisa ser alta o suficiente para facilitar a filtragem de componentes harmônicas indesejáveis na corrente que será fornecida ou absorvida da rede elétrica. No entanto, não pode ser demasiadamente alta, para não aumentar de maneira significativa as perdas por comutação nas chaves estáticas. Além disso, o ouvido humano capta ondas sonoras na faixa entre 20 Hz e 20 kHz, aproximadamente. Assim, valores usuais para tal frequência começam em 20 kHz e podem atingir valores acima de 50 kHz. Portanto, adotou-se a frequência de 21 kHz para chaveamento das seis chaves dos conversores.

A ondulação na tensão do link c.c. não pode ser muito pequena (quase nula), porque isso implicaria a necessidade de se adotar um capacitor muito grande no link c.c.. Também não pode ser muito grande, porque implicaria em ondulação excessiva na tensão naquele ponto. Um valor razoável varia entre 1% e 5%, de modo que foi adotado o valor de 2%, o que, para uma tensão média de 400 V, significa uma ondulação de 8 V entre os valores máximo e mínimo.

Enfim, uma ondulação muito pequena na corrente nos indutores provocaria a necessidade de se adotar valores de indutância muito elevados e uma muito grande implicaria na possibilidade de o conversor *Boost* operar em condução descontínua (não desejável neste trabalho) e o conversor c.c./c.a. injetar ou drenar uma corrente excessivamente distorcida da rede. Assim, para o conversor c.c./c.a. adotou-se uma variação máxima de +/- 5% da corrente média do indutor e para o conversor c.c./c.c. adotou-se uma variação máxima de +/- 25% sobre o valor de pico. Esta última pode ser considerada um tanto elevada, mas ainda é aceitável e tem o objetivo de não ser necessário um indutor ainda maior que o que foi, de fato, projetado.

Cálculo dos Parâmetros do Conversor c.c./c.c. Com as especificações contidas na Tab. 1, calcularam-se os demais parâmetros para o conversor *Boost* através das Eqs. 2 a 4 (MARTINS; BARBI, 2008):

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

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

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

Cálculo dos Parâmetros do Conversor c.c./c.a. Para o conversor c.c./c.a., calculou-se os seguintes parâmetros apresentados nas Eqs. 5 a 7 (NETO *et al.*, 2013):

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

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

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

Os resultados das Eqs. 2 a 7 são apresentados na Tab. 2, tendo-se adotado como valor de indutância do indutor do conversor *Boost* o valor de 1,00 mH, para a indutância do indutor do filtro L o valor de 2,00 mH e para a capacitância do banco de capacitores do *link* c.c. o valor de 1,88 mF (quatro capacitores de 470 μ F em paralelo).

Tabela 2 – Valores calculados.

PARÂMETRO	VALOR / UNIDADE
Corrente média no indutor do <i>Boost</i> ($I_{L_{bmed}}$)	6,43 A
Razão cíclica nominal da chave principal do <i>Boost</i> (D_b)	0,22
Indutância mínima do <i>Boost</i> (L_b)	1,00 mH
Pico da corrente no indutor do filtro L ($I_{L_{pico}}$)	12,86 A
Indutância mínima do filtro L (L_f)	1,85 mH
Capacitância mínima do <i>link</i> c.c. (C_{lk})	1,66 mF

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para as chaves, optou-se pela utilização de IGBTs, modelo IRGP4063DPbF do fabricante *International Rectifier*. Seus parâmetros principais estão resumidos na Tab. 3.

Tabela 3 – Parâmetros das chaves estáticas utilizadas.

PARÂMETRO	VALOR / UNIDADE
Tensão máxima entre coletor e emissor (V_{CEmax})	600 V
Corrente máxima de coletor (I_{cmax}) (@ 100 °C)	48 A
Temperatura máxima de junção (T_{jmax})	175 °C
Queda de tensão típica entre coletor e emissor (V_{CEon})	1,65 V
Queda de tensão típica no diodo intrínseco (V_D)	1,45 a 1,95 V

Fonte: Datasheet do fabricante (*International Rectifier*).

4.2 Implementação

A implementação do protótipo foi realizada em bancada de laboratório utilizando componentes comerciais. O barramento c.c. foi emulado por uma fonte c.c. comercial de 500 V / 20 kVA, ao passo que o barramento c.a. foi emulado por uma c.a. de 300 V / 30 kVA. A alimentação dos drivers foi realizada por três pequenas fontes c.c. de 30 V em série e o microcontrolador por uma fonte de 15 V. A Fig. 5 mostra a representação do sistema.

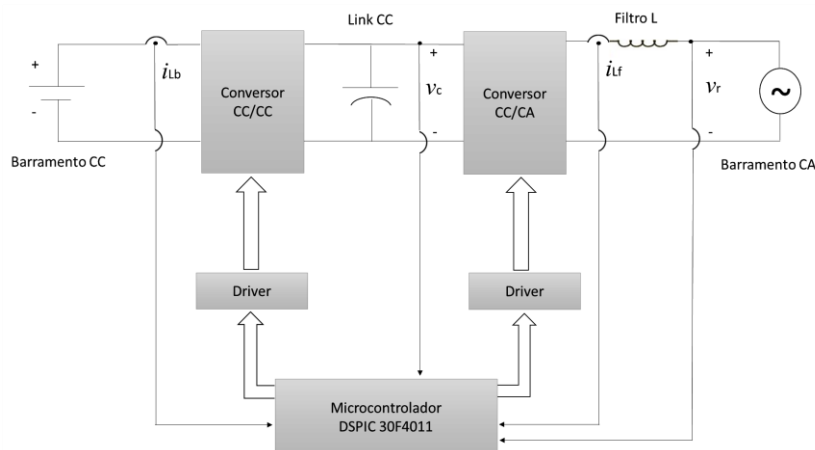


Figura 5 – Representação do sistema proposto. Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste sistema, representado pela Fig. 5, tem-se um barramento c.c. de 311 V, um conversor c.c./c.c., um conversor c.c./c.a., ambos bidirecionais, e um barramento c.a. de 220 V_{rms}. Ainda no circuito de potência tem-se um banco de capacitores, de 470 µF, entre os dois conversores, e um filtro indutivo de 2 mH. No circuito de controle temos um microcontrolador comercial da empresa *Microchip*, modelo *dsPIC* 30F4011. Finalizando, temos os *drivers* realizando a interface entre o circuito de controle e o de potência (chaves).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, foi operado o conversor c.c./c.c. como *Boost* e de forma isolada. Como discutido anteriormente, este conversor possui duas malhas de controle: uma de tensão e uma de corrente. Para testar seu funcionamento, foi realizado um degrau de carga, de 50% para 100% da nominal. O resultado é apresentado na Fig. 6 (a). Observando a Fig. 6 (a), é possível verificar que o controle funcionou bem, mantendo a tensão no link c.c. praticamente inalterada. O tempo de resposta também foi adequado. Ainda em situação de regime estacionário, a tensão e a corrente no indutor são mostradas na Fig. 6 (b).

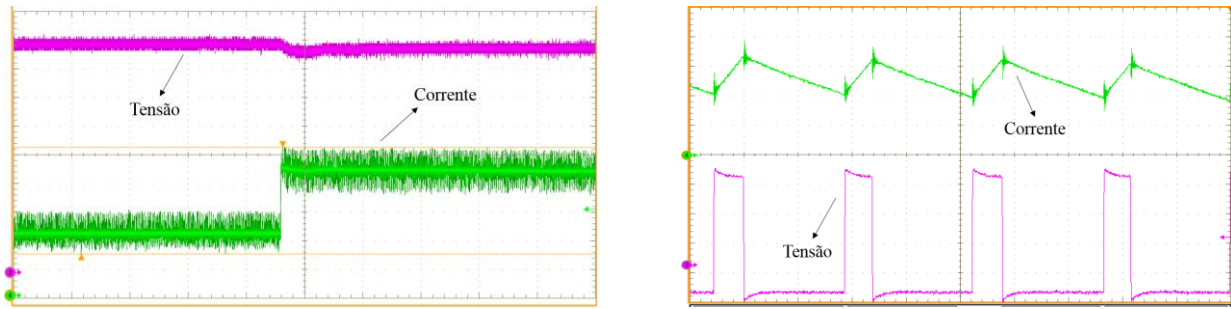


Figura 6 – (a) Tensões na saída [100 V/div] e corrente na carga alimentada pelo *Boost* [2 A/div]; (b) Tensão [50 V/div] e corrente no indutor do *Boost* [1 A/div].

Por fim, as formas de onda da tensão e da corrente no indutor são mostradas na Fig. 7 (a). Após testar o controle do conversor c.c./c.c. de forma isolada e de observar que a tensão no *link* c.c. permanecia estável mesmo com grandes variações de carga, interligou-se o conversor c.c./c.a. para alimentar uma carga resistiva. Foi testada a modulação da corrente a ser fornecida à carga diretamente a partir da saída da *PLL*. Assim, o resultado foi o apresentado na Fig. 7 (b).

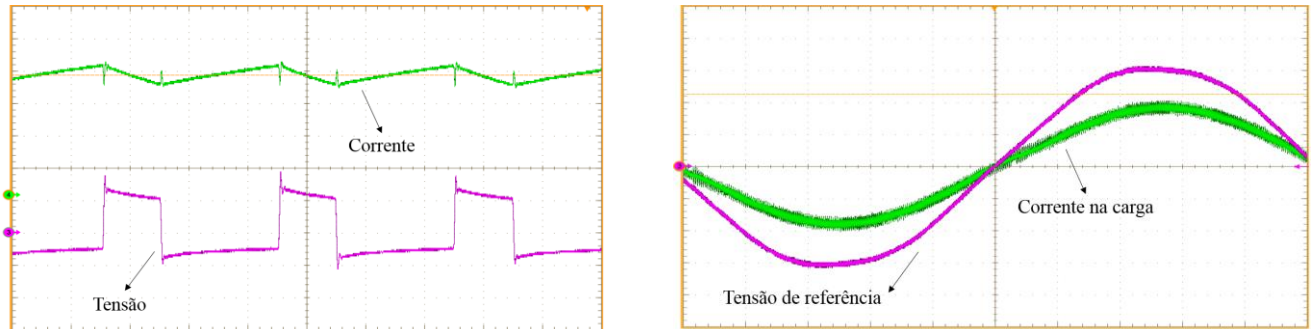


Figura 7 – (a) Tensão [300 V/div] e corrente no indutor do *Buck* [2 A/div]; (b) Tensão de referência da rede [100 V/div] e corrente na carga [800 mA/div].

Esta corrente apresentada na Fig. 7 (b) tem um *THDi* de 2,9% e um fator de potência de 0,99. Na Fig. 8 (a), pode-se observar a tensão sobre o indutor do filtro L em comparação com a corrente que passa por ele. Na Fig. 8 (b) pode-se verificar as tensões nos extremos do conversor, ou seja, na entrada c.c. (barramento) e na carga c.a.. A tensão no barramento c.c. é de 315 V (valor médio) e na carga é de 203 V_{rms}.

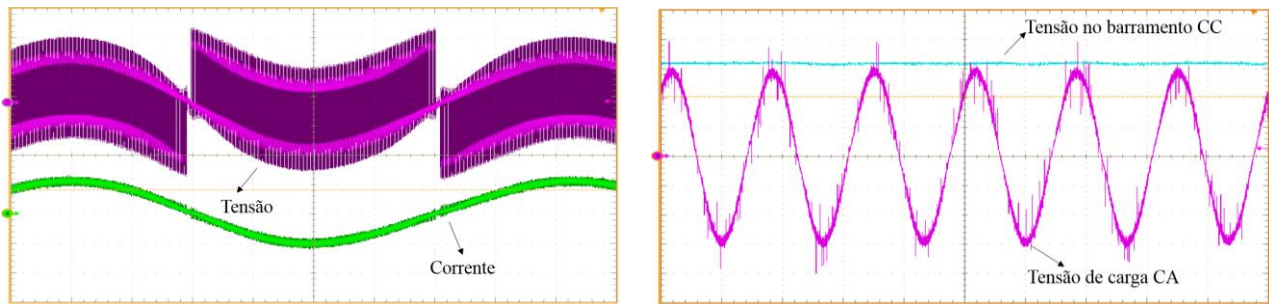


Figura 8 – (a) Tensão [100 V/div] e corrente no indutor do filtro L [3 A/div]; (b) Tensão do barramento c.c. e da carga c.a. [100 V/div].

Por fim, quando o conversor c.c./c.a. operou com sua malha de corrente, o resultado foi o apresentado na Fig. 9 (a), que faz a comparação entre a corrente e a tensão de referência (rede c.a.). Nesta situação, o *THDi* foi de 3,9% e o fator de potência foi de 0,98. A tensão no barramento c.c. e corrente na carga c.a. podem ser comparados na Fig. 9 (b).

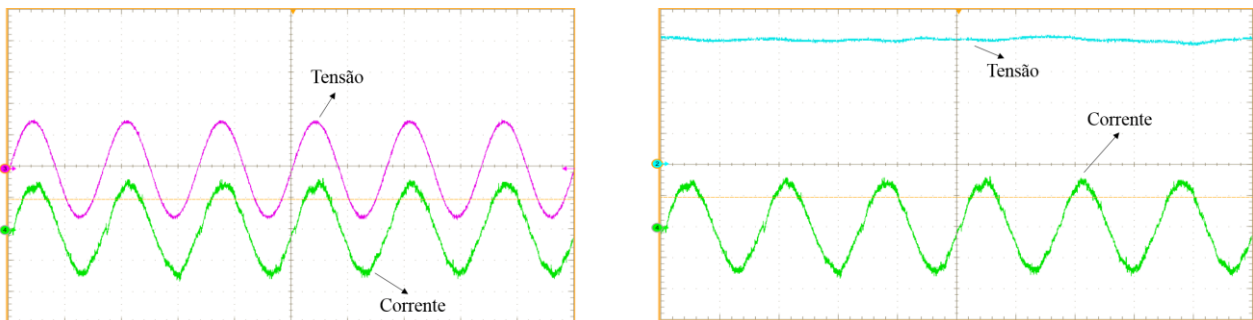


Figura 9 – (a) Tensão de referência da rede [200 V/div] e corrente no indutor do filtro L [5 A/div]; (b) Tensão do barramento c.c. [100 V/div] e corrente na carga c.a. [5 A/div].

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi apresentada uma proposta de projeto de conversor c.c./c.a. para conexão de um barramento c.c. de 311 V a um barramento c.a. de 220 V_{rms}, ambos integrantes de uma microrrede, estando o primeiro junto à fonte solar-fotovoltaica e o último junto à rede elétrica.

O conversor proposto apresentou resultados satisfatórios e teve seus objetivos parcialmente 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 de simulação e, principalmente, com a implementação do protótipo, que, com a estratégia de controle aplicada, é possível controlar o fluxo de potência (injetado ou retirado) e modular a corrente que flui entre os barramentos c.c. e c.a..

A distorção harmônica total da corrente fornecida pelo conversor em uma carga resistiva foi de 3,9%. O fator de potência apresentou valores adequados, de 0,98. A tensão no *link* c.c. também apresentou o comportamento previsto nas especificações, oscilando menos que 2% do seu valor médio e a corrente nos dois indutores se comportou de modo similar ao observado nas simulações. O rendimento medido no conversor c.c./c.c. foi de 96,4% operando em condição nominal. No conversor c.c./c.a. (incluindo o indutor do filtro L), o rendimento obtido foi de 94,4%. Assim, o rendimento global foi de 91%.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, <http://www.aneel.gov.br/>, Acessado em 10 de dezembro de 2015.
- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL: Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica, 2014.
- Barbi, I.; Martins, D. C., Eletrônica de potência: Conversores c.c.-c.c. básicos não isolados. 377p. 3ª edição, Edição dos autores, Florianópolis–SC, 2008.
- Centro de Pesquisas em Energia Elétrica – CEPEL, As Energias Solar e Eólica no Brasil, 2013.
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE: Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira, 2012.
- Hart, D. W., Power Electronics, 477p. New York–NY, McGraw-Hill Inc., 2011.
- Martins, D. C.; Barbi, I., Eletrônica de potência: Introdução ao estudo dos conversores c.c.-c.a.. 489p. 2ª edição, Edição dos autores, Florianópolis–SC, 2008.
- Ministério de Meio Ambiente – MMA: <http://www.mma.gov.br/>, Acessado em 28 de maio de 2014.
- Neto, J. A. F.; Brito Jr, F. J. B.; Joca, D. R.; Nunes, M. A. N.; Torrico-Bascopé, R. P., A five-level NPC bidirectional converter based on multi-state switching cell operating as boost rectifier. XII Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Gramado, 2013.
- Pomílio, J. A. Conversor Elevador de Tensão (Boost) como PFP. Campinas: UNICAMP, 2007. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/pfp/Cap3.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2012.
- Santos, H. A.; Dias Júnior, A. J. S.; Antunes, F. L. M., Projeto de Conversor C.C.-C.A. Controlado para uma Microrrede, V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, 2014.
- Santos, H. A.; Projeto de Conversor c.c.-c.a. Monofásico Controlado para Interligação de Barramentos c.c. e c.a. de uma Microrrede, (Dissertação de Mestrado), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, 2014.
- Ximenes, S. C., Projeto de um Conversor c.c.-c.a. Trifásico para Interligar um Sistema Fotovoltaico à Rede Elétrica, (Dissertação de Mestrado), Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará, 2012.

GRID CONNECTED CONVERTER FOR PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM APPLICATION

Abstract. *The recent growth expectation of the participation of solar-photovoltaic energy sources in the power generation matrix has significantly increased 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 2 kW single phase dc-ac converter for connecting a photovoltaic generation system to the electrical grid. The study shows that it is possible to control the power flow, as well as properly modulating the current flowing to the grid. The prototype had a yield of about 91% and has injected electric current with low harmonic content.*

Key words: *Photovoltaic Generation, Static Converters, Grid Connection.*