

# Conversão de Energia em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

A. D. A. Melquíades e C. M. S. Neto

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA  
Departamento de Engenharias e Tecnologia  
Rodovia BR-226, s/n, Pau dos Ferros - RN, 59900-000, Pau dos Ferros, RN, Brazil

daiaramelquiades@gmail.com, cecilio.martins@ufersa.edu.br

**Abstract.** *This work aims to analyze the process of energy conversion in photovoltaic systems connected to the grid and its relevance to the micro and distributed minigeration. The concepts used address issues such as power generation and the types of schemes most used, with emphasis on photovoltaic systems. The data are extracted by means of graphs of a monophasic photovoltaic system connected to the grid, designed and simulated in environment (Software for Power Electronics Simulation - PSIM). The results of the study propose an alternative for the generation of clean and renewable electricity through the use of the solar resource, aiming at a possible reduction of the use of hydroelectric plants, which may allow a minimization of the environmental and social impacts caused by the use of this type of system.*

**Resumo.** *Este trabalho tem como objetivo analisar o processo de conversão de energia em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica e sua relevância para a micro e minigeração distribuída. Os conceitos utilizados abordam temas como geração de energia e os tipos de esquemas mais empregados, com ênfase para os sistemas fotovoltaicos. Os conceitos utilizados abordam temas como geração de energia e os tipos de esquemas mais empregados, com ênfase para os sistemas fotovoltaicos. Os dados são extraídos por intermédio de gráficos de um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica, projetado e simulado em ambiente Software for Power Eletronics Simulation - PSIM. Os resultados do estudo propõe uma alternativa para a geração de energia elétrica limpa e renovável através do uso do recurso solar, visando uma possível redução do uso das hidrelétricas, o que pode permitir uma minimização dos impactos ambientais e sociais acarretados pelo uso desse tipo de sistema.*

## 1. Introdução

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a matriz energética brasileira é bastante diversificada, sendo composta principalmente por fontes hidráulicas, gás natural, eólica, solar, biomassa, combustíveis fósseis, energia nuclear, carvão e seus derivados. O Brasil dispõe de uma matriz energética de origem predominantemente renovável, com destaque para as fontes hídras, eólicas e solar fotovoltaica que correspondem a cerca de 72,13% da oferta interna. Nos últimos anos, os sistemas de geração baseados em fontes renováveis, tornaram-se mais populares devido ao aumento da demanda e a escassez das reservas energéticas. Essa notável contribuição se deve a inclusão

dos sistemas de minigeração e microgeração distribuídos, que consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais que utilizam como base fontes renováveis [GALDINO and PINHO 2014, Neto and Souza 2018].

Segundo a ANEEL, em 2017 os sistemas de geração distribuída apresentaram um aumento de 245% de contribuição na matriz energética brasileira, sendo 46,2% da energia gerada oriunda de usinas fotovoltaicas. Em geral, os sistemas fotovoltaicos em micro ou minigeração distribuída operam conectados à rede elétrica, concessionária de energia local, por meio de um conversor de potência. Em geral, os sistemas fotovoltaicos em micro ou minigeração distribuída operam conectados à rede elétrica, concessionária de energia local, por meio de um conversor de potência [EPE 2018].

Em geral, os conversores de potência tem por função garantir a operação dos módulos e fornecer potência a rede elétrica. A estrutura do sistema de geração fotovoltaico pode ser composta por um ou dois estágios [Gao et al. 2009]. Na topologia de um estágio, o sistema utiliza de uma única unidade de conversão (CC/CA) para rastrear o ponto de máxima potência (do inglês, Maximum Power Point Tracking - MPPT) e fazer a conexão com a rede elétrica [Alajmi et al. 2013]. No entanto, essa topologia necessita de um transformador elevador, que reduz a eficiência e aumenta o custo, e um número mínimo de módulos fotovoltaicos requeridos [Alajmi et al. 2013].

A topologia de dois estágios consiste na forma convencional de implementação de um sistema de geração fotovoltaica. No primeiro estágio, é realizado uma elevação da tensão gerada pelo painel, geralmente por meio de um conversor de potência do tipo *Boost*, e a implementação do algoritmo MPPT. No segundo estágio, é empregado um inversor fonte de tensão (do inglês, Voltage Source Inverter - VSI) para conexão é injeção da potência produzida pelo sistema na rede elétrica [Fallahzadeh et al. 2017, Wu et al. 2011].

Para suavizar os harmônicos de ordem elevada introduzidos pelo VSI é utilizado um filtro implementado por circuitos L (indutor), LC(indutor e capacitor) ou LCL (indutor, capacitor e indutor) [de Oliveira Alves Rocha 2015]. Os filtro L e LC não são indicados para utilização em sistemas de grande porte, pois necessitam de um indutor com alto valor de impedância. Por outro lado, o LCL é o mais utilizado, pois os indutores utilizados possuem valores de indutância bem menores se comparado aos filtros L e LC [Sosa et al. 2014, de Oliveira Alves Rocha 2015].

O MPPT é responsável por monitorar as modificações nos parâmetros de tensão e corrente, evitando perdas e garantindo que o sistema opere fornecendo a máxima potência. Em geral, os algoritmos de MPPT são classificados em métodos diretos (perturbação e observação, condutância incremental, realimentação de tensão e realimentação de corrente) e indiretos (aproximação da curva de potência, análise de tabela, observação de circuito aberto e observação de curto-circuito) [Barreto 2014]. Dentre esses métodos, a perturbação e observação é a técnica mais utilizada, devido a sua simplicidade e desempenho satisfatório [Ahmed and Salam 2018, Ahmed and Salam 2016, Barreto 2014].

Com base nesse cenário, os sistemas fotovoltaicos surgem como uma alternativa eficaz na continuidade e manutenção do sistema elétrico brasileiro e, conseqüentemente, no desenvolvimento econômico do país. Além disso, o acesso a energia elétrica oriunda de sistemas fotovoltaicos possibilita o incremento da qualidade de vida e contribui na

redução de impactos socioambientais, do efeito estufa e do aquecimento global. Desta forma, o objetivo deste trabalho é analisar o processo de conversão de energia solar fotovoltaica em energia elétrica por meio de simulações afim de analisar os fatores associados a esse processo.

## 2. Descrição do Sistema

Na Figura 1 é apresentado o diagrama de blocos simplificado do sistema fotovoltaico monofásico, de dois estágios, utilizado neste trabalho. De acordo com o diagrama, o sistema analisado é composto por: um arranjo fotovoltaico, um conversor do tipo boost em conjunto com um MPPT, um inversor e um filtro LCL para conexão do sistema com a rede elétrica.

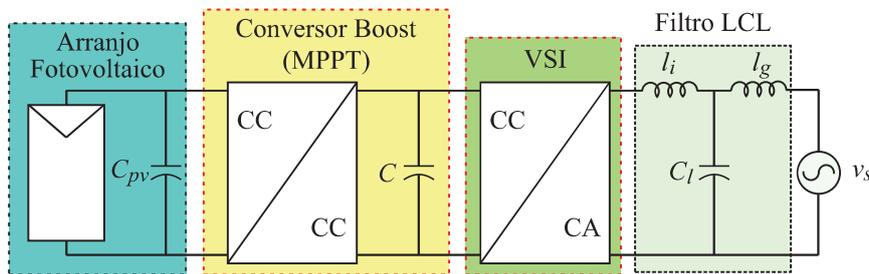


Figura 1. Sistema Fotovoltaico simulado em ambiente PSIM.

O comportamento do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, apresentado na Figura 1, pode ser analisado por meio de um circuito elétrico equivalente, conforme ilustrado na Figura 2.

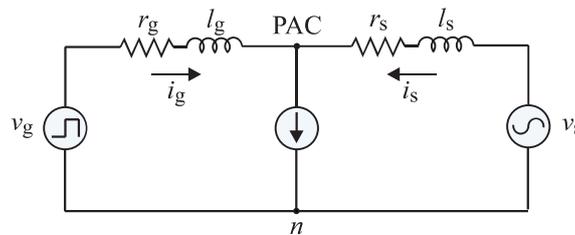


Figura 2. Circuito equivalente do sistema.

### 2.1. Modelagem do Conversor

O comportamento dinâmico do conversor de potência conectado à rede elétrica pode ser obtido pela análise do circuito equivalente. Aplicando as leis de Kirchhoff, temos:

$$v_g - r_g i_g - l_g \frac{di_g}{dt} + r_s i_s + l_s \frac{di_s}{dt} - v_s = 0, \quad (1)$$

$$v_g + v_l - v_s = (r_g + r_s) i_g + (l_g + l_s) \frac{di_g}{dt}, \quad (2)$$

sendo a tensão  $v_l$  dada por:

$$v_l = r_s i_l + l_s \frac{di_l}{dt} \quad (3)$$

Considerando  $v_s$  e  $v_l$  como perturbações a serem compensadas pelo esquema de controle, o modelo do sistema pode ser reescrito por:

$$v'_g = r_t i_g + l_t \frac{di_g}{dt}, \quad (4)$$

sendo  $r_t = r_g + r_s$  e  $l_t = l_g + l_s$ .

Reescrevendo a Equação 4, obtemos a função de transferência do sistema, como segue:

$$\frac{I_g(s)}{V'_g(s)} = \frac{1l_t}{s + r_t l_t} \quad (5)$$

## 2.2. Modelagem do Barramento CC

O modelo matemático do barramento CC utilizado neste artigo é dado por:

$$\frac{V_c(s)}{I_c(s)} = \frac{1}{sC}, \quad (6)$$

em que  $C$  é o capacitor do barramento CC.

Para reduzir a influência das flutuações de tensão na medição do barramento CC, foi empregue um filtro passa-baixa de primeira ordem dado pela seguinte função de transferência:

$$G_v(s) = \frac{1}{1 + s\tau_v}, \quad (7)$$

em que  $\tau_v$  é a constante de tempo do filtro passa-baixa.

Portanto, o modelo dinâmico do barramento CC do conversor conectado à rede elétrica é dado por:

$$\frac{V_g^e(s)}{I_g^e(s)} = \frac{1}{sC(1 + s\tau_v)} \quad (8)$$

A estrutura de controle utilizada neste trabalho é baseada no trabalho proposto por [Barreto et al. 2013]. No entanto como o principal objetivo deste artigo é analisar o processo de conversão de energia solar fotovoltaica em energia elétrica, a estrutura de controle não será abordada neste trabalho. O algoritmo MPPT utilizado neste trabalho é baseado na perturbação e observação [Barreto 2014]. Neste caso, o ponto de máxima potência é determinado de forma indireta, a partir do balanço de energia, obtido pela observação da corrente de eixo direto no referencial vetor tensão da rede elétrica. De uma forma geral, a perturbação  $\Delta D$  é inserida pelo incremento ou decremento da relação cíclica  $D$ , do conversor [Barreto 2014, de Oliveira Alves Rocha 2015].

### 3. Resultados Obtidos

Resultados de simulação são bastante importantes para verificar o comportamento do sistema e para servir como base para implementações experimentais. Com base nisso, foi desenvolvido um estudo de simulação de um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede elétrica por meio de conversores de potência. Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros do sistema simulado no *software* PSIM.

**Tabela 1. Parâmetros do sistema simulado.**

Arranjo Fotovoltaico	$p_{pv} = 1 \text{ KWp}$	$S_0 = 1000 \text{ W/m}^2$	$T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
Conversor Boost	$L_{Boost} = 2 \text{ mH}$	$C_{Boost} = 4700 \mu\text{F}$	
Filtro LCL	$l_i = 1 \text{ mH}$	$l_g = 500 \mu\text{H}$	$C_l = 7,5 \mu\text{F}$
Tensão do barramento CC	$v_c = 450 \text{ V}$		
frequência de chaveamento	$f_s = 10 \text{ KHz}$		

A simulação desenvolvida foi realizada sem carga no ponto de acoplamento comum, ou seja, toda a potência gerada pelo sistema fotovoltaico é fornecida diretamente à rede elétrica. Na Figura 3 são apresentados os sinais de corrente, tensão e de potência gerada pelo sistema fotovoltaico. De acordo com a Figura 2(a), para uma irradiância constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ , temos que a tensão gerada pelo sistema fotovoltaico é de aproximadamente  $139,1\text{V}$ , em corrente contínua. Por outro lado, a corrente do sistema para essas condições é de aproximadamente  $7,2 \text{ A}$ , também em corrente contínua. Com base nisso, baseando-se na Figura 2(b), a potência do sistema fotovoltaico para as condições acima citadas é de aproximadamente  $1\text{kW}$ .

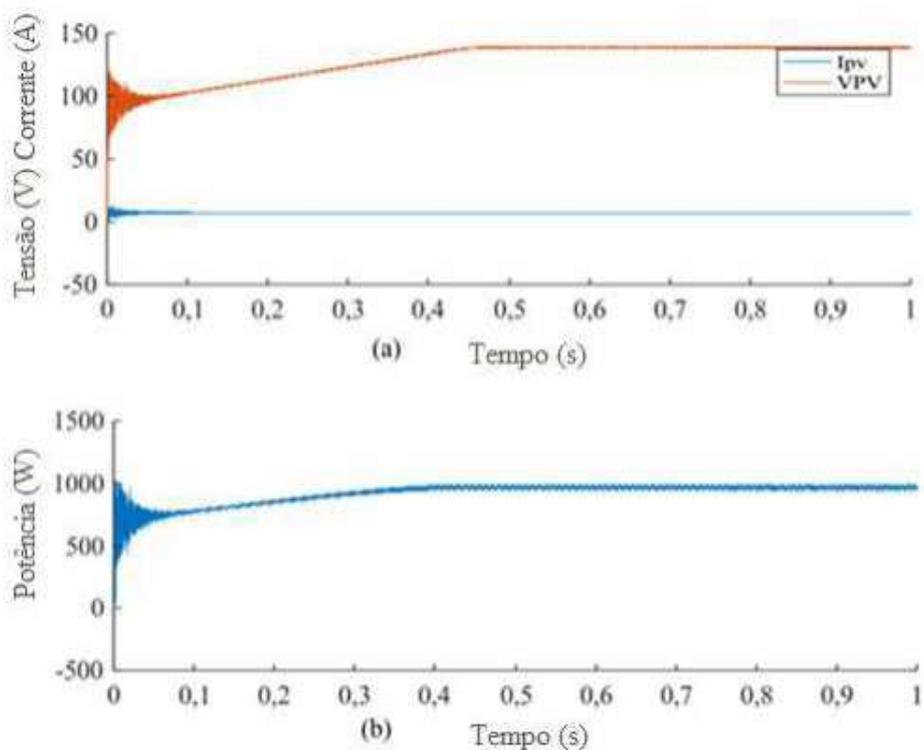


Figura 3. Valores Gerados Pelo Arranjo Fotovoltaico.

O sistema de conversão de energia fotovoltaica utilizado neste trabalho é de dois estágios (CC-CC e CC-CA). O primeiro estágio de conversão utiliza um conversor Boost para realizar a conversão CC-CC e a implementação do MPPT. Na Figura 4 são apresentadas a tensão de entrada e de saída do conversor Boost. De acordo com a Figura 4, a tensão de entrada do conversor Boost/Tensão de saída do sistema fotovoltaico, é de aproximadamente 139,1 V. O sistema de controle do Boost foi projetado para que a tensão de saída fosse controlada em 450 V.

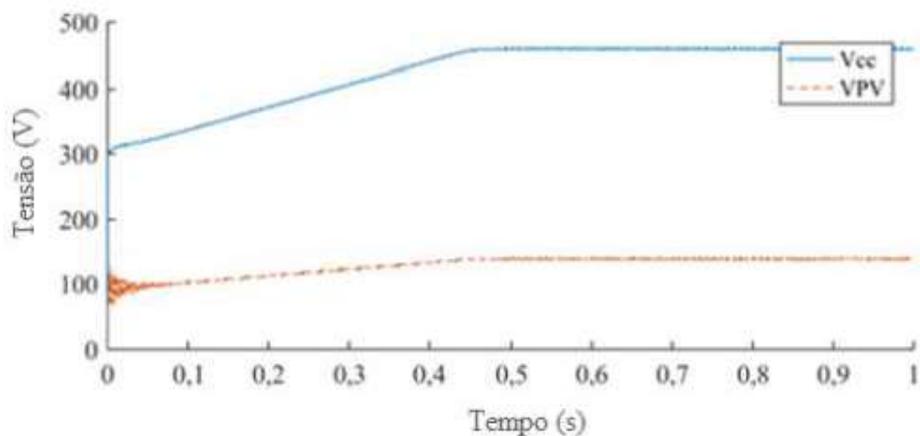


Figura 4. Tensões de Entrada e Saída Referentes ao Primeiro Estágio de Conversão.

O segundo estágio de conversão (CC/CA), é realizado por meio de um VSI, ou seja, a tensão média de saída do VSI apresenta características equivalentes a rede elétrica, ou seja, mesma fase e frequência e (60 Hz), possibilitando a conexão do sistema fotovoltaico a rede elétrica. Na Figura 5 são apresentados os sinais de corrente e tensão da rede elétrica antes e após a conexão do sistema fotovoltaico. Quando o sistema entra em operação, como não existe carga conectada ao ponto de acoplamento, a potência gerada pelo sistema é inteiramente fornecida à rede elétrica. Há também uma inversão na polaridade, conforme ilustrado na Figura 5) ou seja, a potência do sistema é fornecida com um fator de potência unitário, em que apenas a potência ativa é fornecida a rede elétrica.

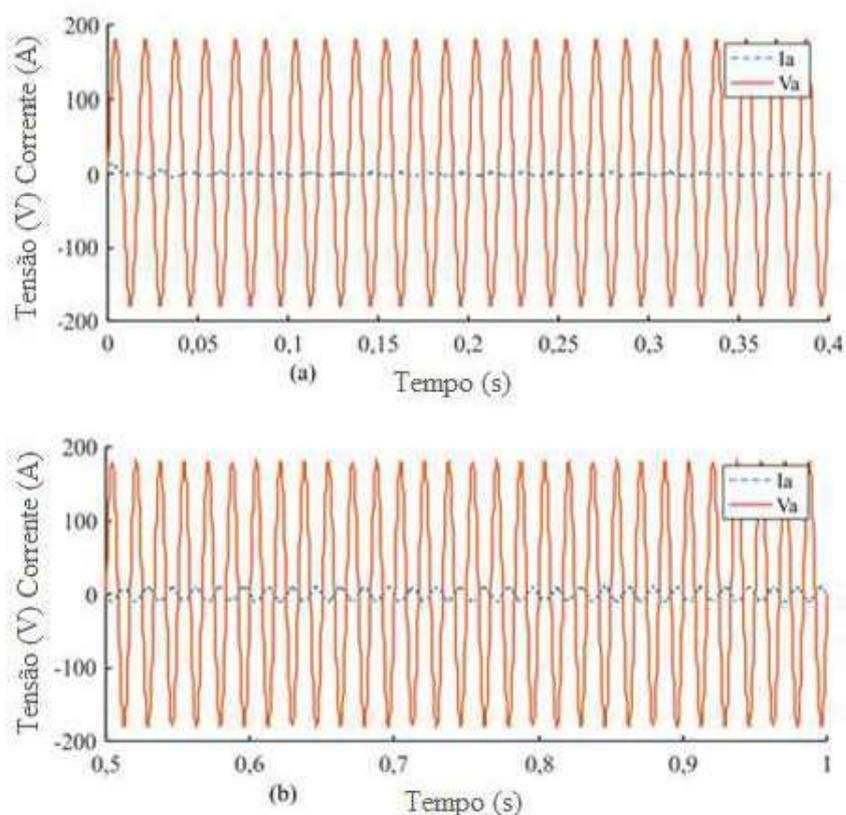


Figura 5. Potência da Rede Elétrica Antes e Após a Conexão.

#### 4. Conclusões

Este trabalho apresentou o processo de conversão de energia solar em energia elétrica em sistemas fotovoltaicos conectados à rede por meio de dois estágios, onde o primeiro estágio realizou a conversão CC/CC e contou com um conversor boost, responsável por elevar a tensão gerada pelo arranjo fotovoltaico e pela busca do ponto de máxima potência, denominado MPPT, enquanto o segundo estágio realizou a conversão CC/CA por meio de um inversor e o qual foi responsável pelo fornecimento da corrente de saída do sistema. O arranjo fotovoltaico foi conectado à rede por meio de um filtro LCL e os resultados obtidos no trabalho foram satisfatórios para a aplicação utilizada.

#### Referências

(2018). Epe - balanço energético nacional 2018: Ano base 2017.

- Ahmed, J. and Salam, Z. (2016). A modified p o maximum power point tracking method with reduced steady-state oscillation and improved tracking efficiency. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 7(4):1506–1515.
- Ahmed, J. and Salam, Z. (2018). An enhanced adaptive p o mppt for fast and efficient tracking under varying environmental conditions. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 9(3):1487–1496.
- Alajmi, B. N., Ahmed, K. H., Adam, G. P., and Williams, B. W. (2013). Single-phase single-stage transformer less grid-connected pv system. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(6):2664–2676.
- Barreto, R. L. (2014). Contribuições ao método de rastreamento de máxima potência para sistemas fotovoltaicos.
- Barreto, R. L., Costa, F. B., Rocha, T. O. A., Neto, C. M. S., Lira, J. R. V., and Ribeiro, R. L. A. (2013). Wavelet-based fault detection in grid-connected photovoltaic systems. In *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, pages 1054–1059.
- de Oliveira Alves Rocha, T. (2015). *Estratégia de Controle Robusto para Interconexão de Sistemas PV Trifásicos à Rede Elétrica*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal - RN.
- Fallahzadeh, S. A. A., Abjadi, N. R., and Kargar, A. (2017). Double-stage grid-connected photovoltaic system with posll converter using pi resonant controller. In *2017 5th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)*, pages 155–160.
- GALDINO, M. A. and PINHO, J. T. (2014). Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. *Revista Virtual de Química*, 7(1).
- Gao, L., Dougal, R. A., Liu, S., and Iotova, A. P. (2009). Parallel-connected solar pv system to address partial and rapidly fluctuating shadow conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(5):1548–1556.
- Neto, C. M. S. and Souza, P. T. V. (2018). Detecção de distúrbios transitórios em geradores síncronos utilizando a transformada wavelet.
- Sosa, J. M., Escobar, G., Martínez-Rodríguez, P. R., Vázquez, G., Juárez, M. A., and Diosdado, M. (2014). Comparative evaluation of l and lcl filters in transformerless grid tied converters for active power injection. In *2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, pages 1–6.
- Wu, T., Chang, C., Lin, L., and Kuo, C. (2011). Power loss comparison of single- and two-stage grid-connected photovoltaic systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(2):707–715.