



## Implementação Prática de Sistemas Fotovoltaicos Monofásicos Operando nos Modos Conectado à Rede Elétrica e Ilhado

### Practical Implementation of a Single-Phase Photovoltaic Systems Operating in Grid-Connected and Islanded Modes

Oswaldo Jackson Silva Vieira dos Santos<sup>1</sup>, Gabriel Evilácio Rissa de Souza<sup>2</sup>, Sebastian de Jesus Manrique Machado<sup>3</sup>, Sérgio Augusto Oliveira da Silva<sup>4</sup>, Leonardo Bruno Garcia Campanhol<sup>5</sup>

#### RESUMO

Este trabalho aborda a implementação prática de sistemas de condicionamento de energia de único estágio, empregados em sistemas fotovoltaicos (PV) com conexão na rede elétrica (*on-grid*) e operação no modo ilhado (*off-grid*). Em ambos os casos, o sistema de condicionamento de energia é implementado utilizando um conversor CC/CA monofásico *full-bridge*, com modulação PWM. No modo de operação *on-grid* o conversor é controlado para operar como uma fonte de corrente senoidal, injetando na rede toda a energia ativa extraída do arranjo PV. Para isso, é adotado o algoritmo P&O para extrair a máxima potência gerada. Tanto a malha de controle de corrente CA quanto a malha de controle da tensão do barramento CC do conversor são implementadas utilizando o controlador PI. Para o modo de operação *off-grid*, o conversor é controlado para operar como uma fonte de tensão senoidal, formando a tensão CA monofásica para alimentação das cargas locais. Neste caso um controle multimalhas é adotado, com controlador PI na malha externa (controle de tensão) e controlador P na malha interna (controle de corrente). Uma vez que não há necessidade de extração da máxima potência do arranjo fotovoltaico em um sistema *off-grid*, tanto a malha de controle da tensão do barramento CC do conversor quanto o algoritmo P&O estarão inoperantes. Ambos os sistemas foram implementados experimentalmente, sendo os resultados coletados via um analisador de qualidade de energia para validação do desempenho de cada topologia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia renovável, conversor *full-bridge*, *on-grid*, *off-grid*, PWM.

#### ABSTRACT

This work addresses the practical implementation of single-stage power conditioning systems, used in photovoltaic (PV) systems with connection to the electrical grid (*on-grid*) and operation in islanded mode (*off-grid*). In both cases, the power conditioning system is implemented using a full-bridge single-phase DC/AC converter, with PWM modulation. In *on-grid* operating mode, the converter is controlled to operate as a sinusoidal current source, injecting all active energy extracted from the PV array into the grid. To achieve this, the P&O algorithm is adopted to extract the maximum power generated. Both the AC current control loop and the DC bus voltage control loop of the converter are implemented using the PI controller. For *off-grid* operation mode, the converter is controlled to operate as a sinusoidal voltage source, forming single-phase AC voltage to supply local loads. In this case, a multi-loop control is adopted, with a PI controller in the external loop (voltage control) and a P controller in the internal loop (current control). Since there is no need to extract maximum power from the photovoltaic array in an *off-grid* system, both the converter's DC bus voltage control loop and the P&O algorithm will be inoperative. Both systems were implemented experimentally, with the results collected via a power quality analyzer to validate the performance of each topology.

**KEYWORDS:** Renewable energy, full-bridge converter, *on-grid*, *off-grid*, PWM.

<sup>1</sup> Bolsista em Iniciação Científica – PIBIT, Fomento: CNPq. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: osvaldosantos@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5695994762052933.

<sup>2</sup> Voluntário em Iniciação Científica – PIBIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: gabrielsouza.2001@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 3299790965405349

<sup>3</sup> Docente na Coordenação de Engenharia Elétrica - COELT-AP. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil E-mail: sebastiand@utfpr.edu.br. ID Lattes: 2866118071883988

<sup>4</sup> Docente na Coordenação de Engenharia Elétrica - COELT-CP. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: augus@utfpr.edu.br. ID Lattes: 7428189879295593.

<sup>5</sup> Docente na Coordenação de Engenharia Elétrica - COELT-AP. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Apucarana, Paraná, Brasil. E-mail: campanhol@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8053457373498978.



## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as fontes de energia renováveis, como os sistemas fotovoltaicos (PV-*Photovoltaic*), ganharam destaque na busca por diversificar a matriz energética. Os sistemas PV capturam a energia solar por meio de módulos fotovoltaicos, transformando-a em energia elétrica em corrente contínua (CC). Devido à sua dependência da irradiação solar e da temperatura, a produção de energia fotovoltaica varia consideravelmente, exigindo um estágio de condicionamento para o sistema. Esses sistemas PV podem operar em duas configurações principais: o sistema conectado à rede elétrica (*on-grid*), e o sistema ilhado (*off-grid*). No sistema *on-grid*, a energia gerada é fornecida à rede elétrica, atuando como um compensador de energia que pode suprir parte ou toda a demanda da carga. Esta conexão é realizada por meio de um sincronismo entre o sistema e a rede elétrica via um sistema PLL (*phase-locked loop*), assim, para essa configuração o sistema não precisa fornecer toda a potência exigida pela carga, já que a rede elétrica lida com a demanda instantânea. No entanto, para que o sistema entregue sempre a máxima potência disponível, é adotado o algoritmo P&O (Perturbe e Observe) para extrair a máxima potência gerada pelo arranjo fotovoltaico (OLIVEIRA, 2015).

Para locais ilhados, o sistema *off-grid* entra em cena. Ele fornece instantaneamente toda a potência necessária à carga, funcionando como uma fonte primária de energia. Em momentos de flutuações na produção de energia, ou quando não há produção, fontes adicionais de tensão, como bancos de baterias, são necessárias. (PINHO; GALDINO, 2014).

Ambas as configurações envolvem conversores estáticos de potência, que condicionam a energia CC fornecida pelos painéis para a forma de corrente alternada (CA) apropriada para o fornecimento de energia. Isso é feito por meio de conversores CC/CA, que são controlados em termos de tensão e corrente (SILVA; CAMPANHOL; BACON; SAMPAIO, 2015).

Neste trabalho, é apresentado os métodos de controle aplicados aos sistemas PV *on-grid* e *off-grid*, bem como sua implementação prática. O objetivo é compreender como esses sistemas funcionam com o sistema *on-grid* injetando potência ativa na rede, compensando a potência exigida pela carga, e o sistema *off-grid* agindo como fonte primária de energia para atender toda a demanda da carga. Os resultados são apresentados por meio de um analisador de qualidade de energia para validar a implementação prática.

## METODOLOGIA

O condicionamento da energia em um sistema PV pode ser realizado de duas maneiras distintas: por meio de um condicionamento de único estágio ou por meio de um condicionamento de duplo estágio. Na conversão de único estágio, emprega-se apenas o conversor de energia CC/CA (inversor), o que exige a utilização de um arranjo fotovoltaico com maiores níveis de tensão, ou seja, maior quantidade de painéis ligados em série, aumentando significativamente a construção do arranjo PV (OLIVEIRA, 2015).

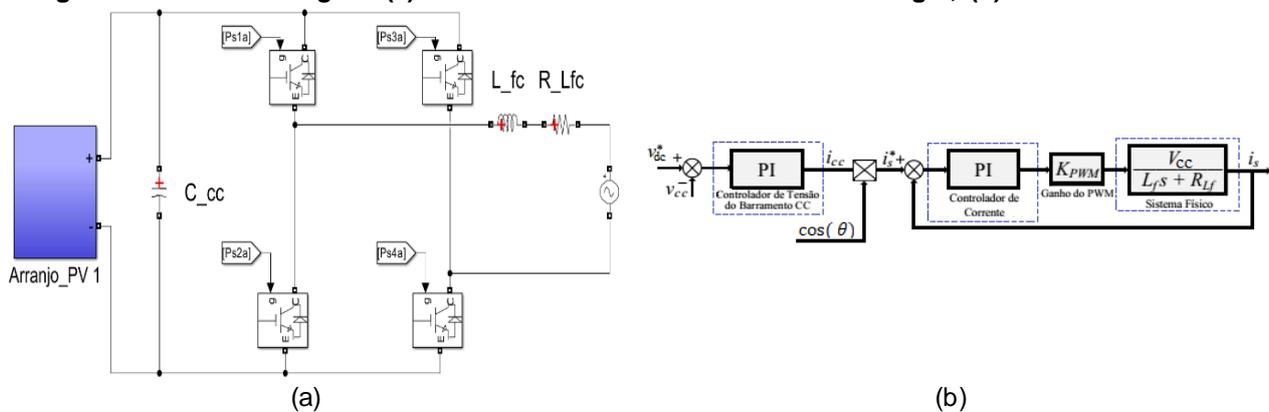
Por outro lado, na conversão de duplo estágio, são necessários dois conversores que operam em conjunto. O primeiro estágio é responsável pela elevação da tensão CC, enquanto o segundo realiza a conversão da energia de CC para CA. Embora essa configuração permita um arranjo fotovoltaico com níveis de tensão mais baixo, devido à elevação da tensão no primeiro estágio, ela resulta em maiores perdas de conversão devido à necessidade de dois conversores.

Neste contexto, a topologia de conversão de único estágio é escolhida para esta implementação, uma vez que se tem disponível um arranjo fotovoltaico com níveis de tensão adequados para essa abordagem.

### SISTEMA PV ON-GRID

O sistema fotovoltaico *on-grid* desempenha o papel de fornecer potência ativa para a rede elétrica, assegurando que a potência máxima disponível nos painéis solares seja sempre aproveitada. Dessa forma, o sistema age como uma fonte de corrente (FC) senoidal, conectando-se à rede elétrica por meio de um acoplamento indutivo, o que possibilita o controle preciso da corrente injetada na rede elétrica. Sua configuração pode ser compreendida por meio do circuito equivalente apresentado na Figura 1-a.

**Figura 1 – Sistema *on-grid*: (a) Estrutura de condicionamento de energia; (b) Malha de controle**



Fonte: Próprio autor.

Nesta configuração é utilizado um conversor CC/CA monofásico em ponte completa (*full-bridge*), onde o controle das chaves de potência é realizado por uma modulação por largura de pulso (PWM – *Pulse Width Modulation*) a três níveis. Essa estratégia de modulação gera na saída do conversor níveis de tensão de  $0$  a  $+V_{CC}$  e  $0$  a  $-V_{CC}$ , resultando na tensão média entre os pontos A-B ( $V_{AB}$ ). Dado a razão cíclica das chaves de potência e considerando que a frequência de chaveamento é muito maior que a frequência da rede, podemos dizer que a tensão da rede ( $V_S$ ) é constante em um período de comutação, podendo ser representada como uma grandeza CC, assim aplicando perturbações na razão cíclica das chaves e na corrente média do circuito, pode-se obter a função de transferência ( $G_{FC}(s)$ ) para o sistema *on-grid*, conforme equação 1 (HOLTZ, 1992; MOHAN, 1995).

$$G_{FC}(s) = \frac{i(s)}{d_{FC}} = \frac{V_{CC}}{L_{FC} * s + R_{LFC}} \quad (1)$$

De posse da função de transferência do circuito, é possível estabelecer a malha de controle da planta, composta por uma malha tensão do barramento CC conectada à malha interna de controle de corrente do conversor, também denominada de multimalha, como ilustra a Figura 1-b.

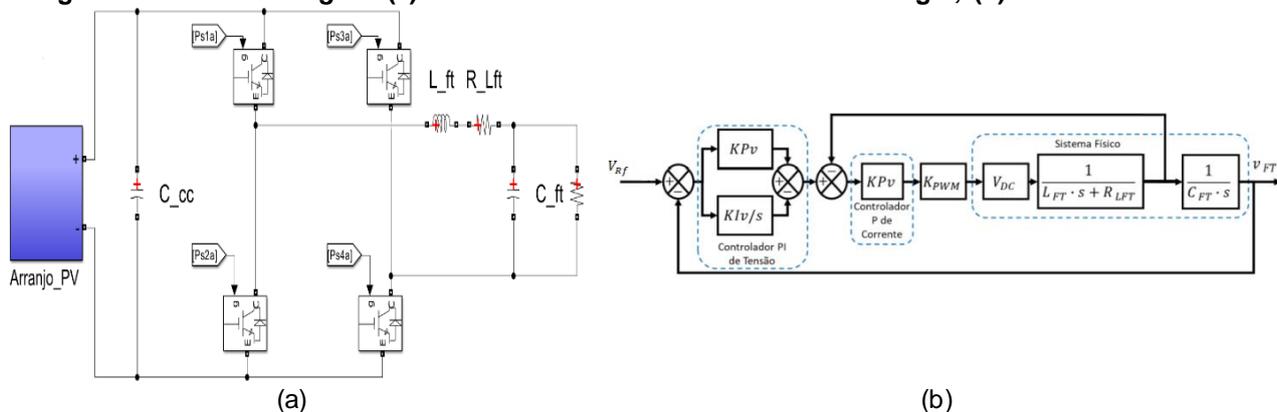
Visto que o sistema *on-grid* deve atuar fornecendo potência ativa, é preciso aplicar métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) ao sistema. Uma das formas de se alcançar esse objetivo é com a implementação de um algoritmo P&O (*Perturbe e observe*). Este algoritmo tem a responsabilidade de

monitorar a energia disponível no PV, retornando um incremento ou decremento à referência de tensão da malha externa, garantindo que o sistema opere sempre com sua máxima potência disponível no PV (SILVA; CAMPANHOL; BACON; SAMPAIO, 2015).

### SISTEMA PV OFF-GRID

O sistema fotovoltaico *off-grid* opera como uma fonte de tensão (FT) senoidal, requerendo acoplamento indutivo e capacitivo. Isso se deve à necessidade de monitorar a tensão CA do sistema, permitindo que o controle mantenha uma tensão senoidal para a carga. Essa conexão é compreendida por meio do circuito equivalente apresentado na Figura 2-a.

**Figura 2 – Sistema *off-grid*: (a) Estrutura de condicionamento de energia; (b) Malha de controle**



Fonte: Próprio autor.

Partindo da mesma analogia utilizada para definir a função de transferência do sistema *on-grid*, pode-se obter a função de transferência ( $G_{FT}(s)$ ) para o sistema *off-grid*, como mostra a equação 2.

$$G_{FT}(s) = \frac{V_{RS}(s)}{d_{FT}} = \frac{V_{CC}}{(L_{FT} * C_{FT} * s^2 + R_{LFT} * C_{FT} * s + 1)} \quad (2)$$

Diferente do sistema *on-grid*, a malha de controle para o sistema *off-grid* não possui um algoritmo de MPPT, pois agora o sistema deve atuar como um formador de rede atendendo integralmente a carga com uma tensão senoidal ( $V_{Rf}$ ). Sua malha de controle completa é representada pela Figura 2-b.

## RESULTADOS

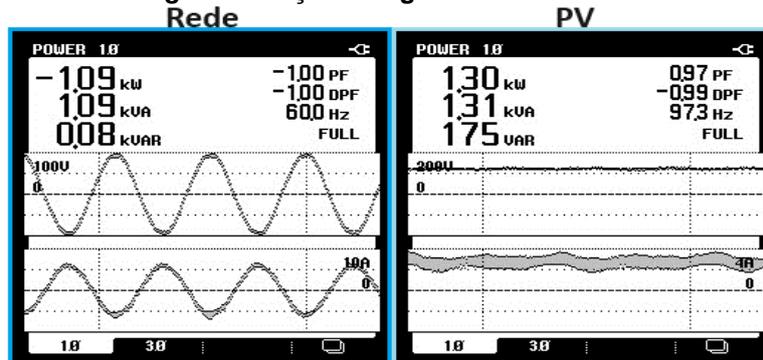
Os dados apresentados foram coletados utilizando o analisador de qualidade de energia Fluke 43B monofásico. O quadro 1 e a Figura 3 ilustra os resultados de injeção de potência para o sistema *on-grid*.

**Quadro 1 – Análise da rede e PV para o sistema *on-grid***

|                            | Rede  | PV    |
|----------------------------|-------|-------|
| <b>Tensão (V)</b>          | 131,9 | 240,5 |
| <b>Corrente (A)</b>        | 8,21  | 5,373 |
| <b>Pot. Ativa (kW)</b>     | -1,09 | 1,30  |
| <b>Pot. Aparente (kVA)</b> | 1,09  | 1,31  |
| <b>Pot. Reativa (kVAr)</b> | 0,08  | 0,175 |
| <b>Fator Potência</b>      | -1    | 0,97  |
| <b>THD tensão</b>          | 2,3%  | 99%   |
| <b>THD corrente</b>        | 2,70% | 99,9% |

Fonte: Próprio autor.

Figura 3 – Sistema *on-grid*: Medições de grandezas da rede elétrica e arranjo PV.



Fonte: Próprio autor.

Com base nos resultados apresentados na Figura 3, é possível observar a potência ativa fornecida pelo sistema sendo injetada na rede. Neste contexto, o algoritmo de MPPT (Maximum Power Point Tracking) garante a otimização do aproveitamento de toda a geração disponível, com o sistema fornecendo a máxima potência ativa à rede. É possível notar que a corrente está em fase contrária à tensão da rede, o que caracteriza o fornecimento de potência, como também é evidenciado pelo valor negativo da potência.

Podemos também, observar as perdas do conversor, dada pela diferença entre a potência fornecida ao conversor, e a potência fornecida à rede elétrica.

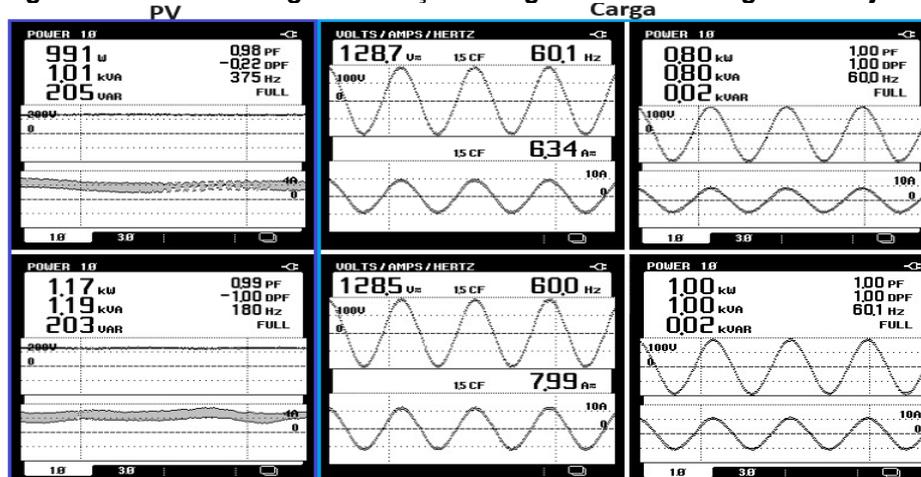
Para o sistema *off-grid* os resultados estão apresentados pelo quadro 2 e figura 4.

Quadro 2 – Análise da rede e PV para o sistema *off-grid*

|                     | Carga R1 = 800W |       | Carga R2 = 1000W |       |
|---------------------|-----------------|-------|------------------|-------|
|                     | PV              | Carga | PV               | Carga |
| Tensão (V)          | 257,3           | 128,7 | 249,5            | 128,4 |
| Corrente (A)        | 3,758           | 6,32  | 4,72             | 7,98  |
| Pot. Ativa (kW)     | 0,991           | 0,8   | 1,17             | 1     |
| Pot. Aparente (kVA) | 1,01            | 0,8   | 1,19             | 1     |
| Pot. Reativa (kVAR) | 0,205           | 0,02  | 0,203            | 0,002 |
| Fator Potência      | 0,98            | 1     | 0,99             | 1     |
| Fator Deslocamento  | -0,22           | 1     | -1               | 1     |
| TDH tensão          | 99,3            | 2,40% | 100              | 2,40% |
| TDH corrente        | 95,10%          | 2,30% | 99,90%           | 2,40% |

Fonte: Próprio autor.

Figura 4 – Sistema *off-grid*: Medições de grandezas da carga e arranjo PV.



Fonte: Próprio autor.



Como um sistema off-grid age como fonte primária de energia para a carga, é essencial que ele forneça toda a potência necessária. Nessa configuração, não ocorre a atuação do algoritmo de MPPT, o que implica que o sistema deve ser projetado de forma a suprir integralmente a demanda da carga. Dado que a geração de energia dos painéis fotovoltaicos está diretamente vinculada às flutuações na radiação solar, torna-se inevitável contar com uma fonte de tensão alternativa para assegurar que a tensão mínima exigida pelo barramento CC seja mantida de forma constante, garantindo assim que a carga não sofra nenhuma interrupção indesejada.

## CONCLUSÃO

Com base no estudo realizado, foi possível implementar com sucesso ambas as topologias abordadas: o sistema *on-grid* e o sistema *off-grid*. Os resultados obtidos neste trabalho destacam a importância em se ter um bom condicionamento de energia, tanto para fins de fornecer potência ativa, quanto para se ter um sistema capaz de fornecer tensão em conformidade com os parâmetros estabelecidos pela rede elétrica, atuando como formador de rede. Conseqüentemente, este estudo validou a importância e eficácia de ambos os sistemas, como meios para diversificar a matriz energética, a fim de melhor atender à crescente demanda por energia.

## Agradecimentos

Os autores agradecem a UTFPR/PROPPG pela Bolsa de Iniciação Tecnológica (PIBIT) recebida por meio do EDITAL PROPPG-04/2022 PIBIT, e aporte financeiro recebido por meio da Chamada Pública 09/2021 - Programa de Pesquisa Básica e Aplicada da Fundação Araucária.

## Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

## REFERÊNCIAS

- HOLTZ, J. Pulse width modulation – A survey. **Industrial Electronics, IEEE Transaction on.**, v. 39, n. 5, p. 410 – 420, oct. 1992.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics: converters, applications and design**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- OLIVEIRA, F. M. **Rastreamento da máxima potência em arranjos fotovoltaicos sob efeito de sombreamento parcial baseado no método de otimização por enxame de partículas**. 2015. Dissertação de mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, PR.
- PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, Março 2014
- SILVA, S. A. O.; CAMPANHOL, B. G.; BACON, V. D.; SAMPAIO, L. P. **SINGLE-PHASE GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH ACTIVE POWER LINE CONDITIONING**. 2015.