

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS ALIMENTANDO CARGAS RESISTIVAS

Amanda Beatriz Falckete Fonseca¹, Luciano de Souza da Costa e Silva¹, Estelio da Silva Amorim¹, Edson Ítalo Mainardi Júnior¹, Diogo Ramalho de Oliveira¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso do Sul – Três Lagoas - MS

amanda.fonseca@estudante.ifms.edu.br, luciano.souza@ifms.edu.br, estelio.amorim@ifms.edu.br, edson.mainardi@ifms.edu.br, diogo.ramalho@ifms.edu.br

Resumo

Com a crescente demanda por eletricidade e o aumento do interesse em fontes de energia mais limpas, a energia solar fotovoltaica está emergindo como uma opção promissora para atender a essa necessidade. Em comparação com as fontes de energia convencionais que dependem da queima de combustíveis para gerar eletricidade, a energia solar fotovoltaica se destaca como uma alternativa favorável ao meio ambiente. Isso se deve ao fato de que, além de não gerar poluentes durante a produção de energia, também é uma fonte inesgotável de recursos. Este trabalho se concentra na análise da eficiência sob diferentes condições de carga, no sistema off grid.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Conversão de Energia. Cargas Conectadas.

Introdução

Ao longo da história, a humanidade utilizou uma variedade de recursos naturais do nosso planeta para satisfazer suas necessidades de energia, sem levar em consideração os efeitos prejudiciais ao meio ambiente. Para aumentar a participação das fontes de energia renovável na matriz energética do Brasil, é crucial reduzir as emissões de poluentes resultantes da queima de combustíveis fósseis. Embora grande parte da energia no Brasil seja gerada por usinas hidrelétricas, uma fonte renovável, essa abordagem enfrenta desafios significativos durante os períodos de escassez de água.

Nesse contexto, a luz solar pode ser explorada como uma fonte de energia limpa e inesgotável. Portanto, é viável utilizar a energia solar para gerar eletricidade por meio de células fotovoltaicas, que, quando agrupadas, formam um painel solar. Cada célula absorve a radiação solar e a transforma em energia elétrica. Quanto mais intensa for a luz solar, mais energia é gerada, embora também ocorram perdas de energia devido ao efeito Joule, que é causado pelo aumento da temperatura.

A energia fotovoltaica, por não emitir poluentes na produção de energia elétrica e por ser considerada inesgotável, vem sendo uma opção promissora na produção de eletricidade. Além disso, a evidência da necessidade de energia solar é notória, pois pode cumprir papel importante na expansão da matriz elétrica brasileira (PEREIRA, MARTINS, GONÇALVES, et al., 2017).

Portanto, todo o esforço para a promoção da diversificação da matriz energética, aumento da capacidade de geração, ou alívio no consumo, deve ser acompanhada da avaliação da qualidade de energia elétrica associada aos respectivos processos. No caso específico da aplicação de sistemas fotovoltaicos em regiões isoladas, a avaliação da qualidade de energia do sistema deve concentrar-se na elevada sensibilidade da fonte de tensão CA às variações de corrente de carga (ARAFAT et al., 2012; DE BOSIO et al., 2016, 2017; HAN et al., 2018; HOUARI et al., 2018). Nestes casos, se a natureza da carga provoca distorção na corrente de saída do sistema; esta mesma corrente pode provocar aumento da distorção na tensão de alimentação, que pode propagar a distorção às correntes de outras cargas conectadas no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). Portanto, a relação de causa e efeito entre tensões e correntes, fontes e cargas, ou, concessionária e consumidor, é complexa. Nesse sentido, a aplicação da norma IEEE-1459 pode auxiliar na medição destes distúrbios, relacionando-os com a definição de novas quantidades de potência, e possibilitando a divisão e atribuição de responsabilidades (ARTALE et al., 2021; LI et al., 2020).

O objetivo deste estudo é analisar um sistema fotovoltaico independente sob a perspectiva da eficiência energética, considerando diferentes tipos de cargas, tanto resistivas quanto indutivas. Pretende-se avaliar o comportamento da corrente contínua e alternada, bem como da tensão e da potência, em diferentes tipos de inversores.

Metodologia

Para a realização do projeto, foram utilizados os seguintes materiais:

- ✓ 4 placas Fotovoltaicas de 270W (cada);
- ✓ 4 baterias estacionárias freedom;
- ✓ 1 inversor de onda senoidal;
- ✓ 1 reostato de 200 Ω;
- ✓ 4 indutores de 150mH;
- ✓ 1 controlador de carga XTRA-N Series;
- ✓ 2 disjuntores monopolar 32A STECK;
- ✓ 1 osciloscópio;

Devido às limitações de corrente e tensão do controlador de carga, dos quatro painéis fotovoltaicos foi possível utilizar apenas um, com potência máxima igual 270 W. Para otimizar o processo e permitir uma melhor análise dos dados obtidos, o sistema estudado foi dividido em três cenários distintos, considerando diferentes tipos de carga e condições de uso do inversor. Em cada um dos cenários mencionados, foram conduzidas medições e análises para avaliar o desempenho do sistema.

- ✓ Cenário 1: Placa fotovoltaica, controlador de carga e bateria.
- ✓ Cenário 2: Placa fotovoltaica, bateria com controlador de carga, inversor onda senoidal com carga resistiva;
- ✓ Cenário 3: Placa fotovoltaica, bateria com controlador de carga, inversor onda senoidal com carga indutiva.

A figura 1-A mostra as placas fotovoltaicas que foram utilizadas no protótipo, já a figura 1-B mostra como foi montado no laboratório o cenário 3 e a figura 1-C ilustra o cenário 2.

Figura 1 - Sistema Estudado.



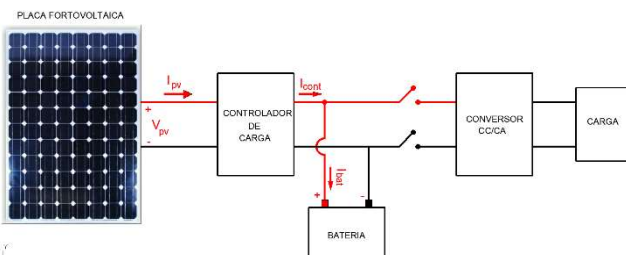
Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Resultados e Discussão

Cenário 1

O primeiro cenário consiste somente em uma placa fotovoltaica, controlador de carga e uma bateria. A Figura 2 representa a configuração do sistema estudado e a figura 3 consiste na montagem prática no laboratório. Desta forma, o cenário foi estabelecido exclusivamente com os elementos que funcionam somente com a componente CC. Analisando o comportamento do painel fotovoltaico, controlador de carga e bateria sem a conexão do inversor e carga não estão conectados no sistema.

Figura 2 - Representação do Primeiro Cenário.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Figura 3. Montagem do Cenário 1 em Laboratório.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A Tabela 1 apresenta as medições da corrente, tensão e potência, considerando que o inversor e carga não estão conectados ao sistema.

Tabela 1 - Dados Obtidos no Cenário 1.

| | Placa Fotovoltaica | Bateria |
|--------------------|--------------------|---------|
| Tensão CC (V) | 26,348 | 13,057 |
| Corrente CC (A) | 7,160 | 12,067 |
| Potência Média (W) | 188,652 | 157,553 |

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Com base na Tabela 1 e Figura 4, observa-se que tensão e a corrente fornecida pela placa fotovoltaica são de 26,348V e 7,16 A, fornecendo uma potência média igual a $P_{pv} = 188,65168W$.

Figura 4 - Tensão e Corrente no Painel Solar.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A partir da Tabela 1 e Figura 5, nota-se que a tensão da bateria é de 13,056V, e a corrente corresponde a 12,067A. Utilizando essas informações, calculou-se a potência da bateria (P_{bat}), resultando em 157,546W.

Figura 5 - Tensão e Corrente na Bateria.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Com as potências calculadas é capaz quantificar o rendimento entre a potência que é fornecida pelo painel fotovoltaico e a corrente que está chegando na bateria após passar pelo controlador de carga, equação 1:

$$\eta = \frac{P_{bat}}{P_{pv}} \times 100 = \frac{157,546}{188,657} \times 100 = 83,51\% \quad (1.0)$$

Sendo:

η = rendimento;

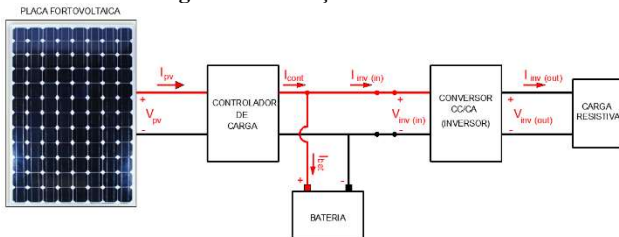
P_{bat} = potência da bateria;

P_{pv} = potência da placa fotovoltaica.

Cenário 2

A Figura 6 corresponde ao cenário 2, onde, foi utilizado um inversor de onda senoidal conectado a uma carga resistiva.

Figura 6: Ilustração do circuito.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A Tabela 2 apresenta os dados obtidos a partir das medições feitas no lado alimentado com forma de onda contínua e no lado alimentado com forma de onda alternada fornecida pelo inversor. Para as medições da corrente, tensão e potência, foi considerando que o inversor de onda senoidal estava conectado a uma carga resistiva. Nota-se que a potência média entregue pelo sistema fotovoltaico ao inversor é igual a 124,29 W, isso porque em sistemas alimentados em corrente contínua não existe potência reativa. A potência aparente entregue a carga pelo inversor é igual a 89,696 VA.

Tabela 2 - Dados Obtidos no Cenário 2

| | Inversor de Onda Senoidal (Entrada Forma de Onda Contínua) | Inversor de Onda Senoidal (Saída Forma de Onda Alternada) |
|------------------------|--|---|
| Tensão (V) | 12,762 | 124,870 |
| Corrente (A) | 9,739 | 0,718 |
| Potência Média (W) | 124,289 | |
| Potência Aparente (VA) | | 89,697 |

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Em amarelo na Figura 8 está representado a forma de onda da tensão de entrada no inversor e na cor rosa, corresponde a corrente entregue ao inversor, $V_{inv (in)} = 12,762 \text{ V}$ e $I_{inv (in)} = 9,739 \text{ A}$, Tabela 2.

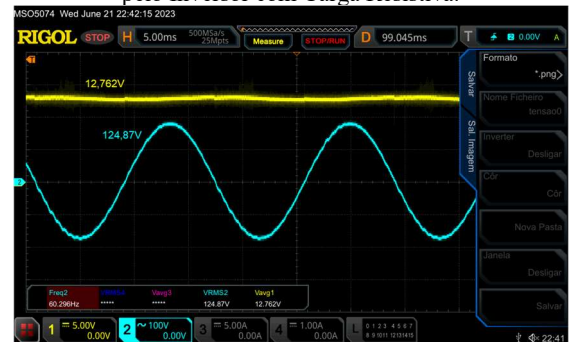
Figura 8 – Corrente e Tensão Contínua Entregue ao Inversor.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Através da observação da Figura 9, nota-se a tensão contínua recebida do sistema fotovoltaico e convertida em tensão alternada pelo inversor de onda senoidal, seus valores são iguais a $V_{inv (in)} = 12,762 \text{ V}$ e $V_{inv (out)} = 124,87 \text{ V}$.

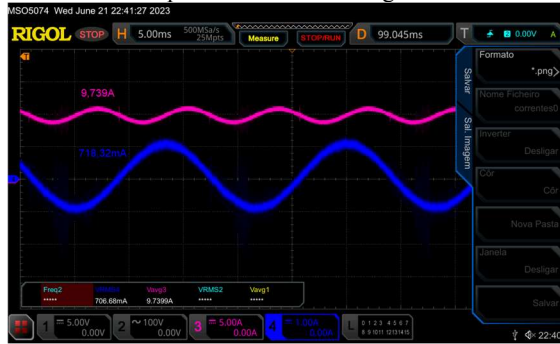
Figura 9 - Conversão da Tensão Contínua em Tensão Alternada pelo Inversor com Carga Resistiva.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Por meio da Figura 10 e da Tabela 2, é possível verificar a corrente contínua recebida do sistema fotovoltaico e convertida em corrente alternada pelo inversor de onda senoidal, seus valores são iguais a $I_{inv (in)} = 9,739 \text{ A}$ e $I_{inv (in)} = 0,71832 \text{ A}$.

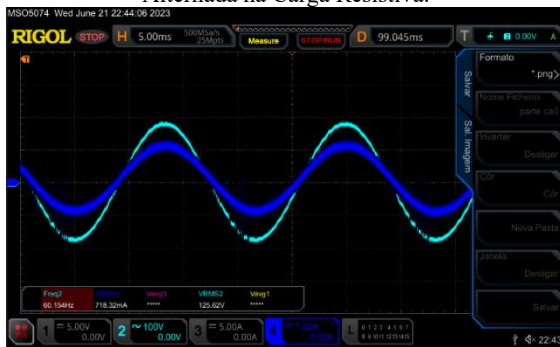
Figura 10 - Conversão da Corrente Contínua em Corrente Alternada pelo Inversor com Carga Resistiva.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Nota-se na Figura 11 que em uma carga resistiva a corrente está atrasada em relação a tensão formando um ângulo de defasagem (Θ) igual a zero.

Figura 11 – Defasamento da Forma de Onda da Tensão e Corrente Alternada na Carga Resistiva.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Cenário 3:

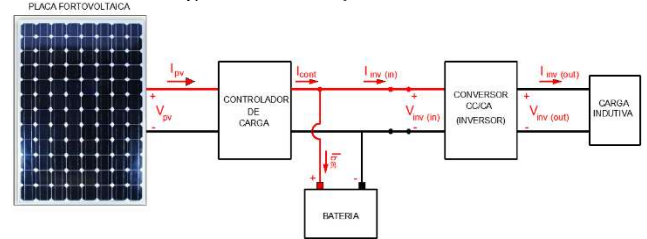
No terceiro cenário consiste em manter o inversor de onda senoidal, porém a carga resistiva é substituída por uma carga indutiva.

Tabela 3 - Dados Obtidos no Cenário 3

| | Inversor de Onda Senoidal (Entrada Forma de Onda Contínua) | Inversor de Onda Senoidal (Saída Forma de Onda Alternada) |
|------------------------|--|---|
| Tensão (V) | 13,152 | 131,530 |
| Corrente (A) | 4,526 | 1,757 |
| Potência Média (W) | 59,526 | |
| Potência Aparente (VA) | | 231,098 |

Fonte: Elaborada pela autora (2023).

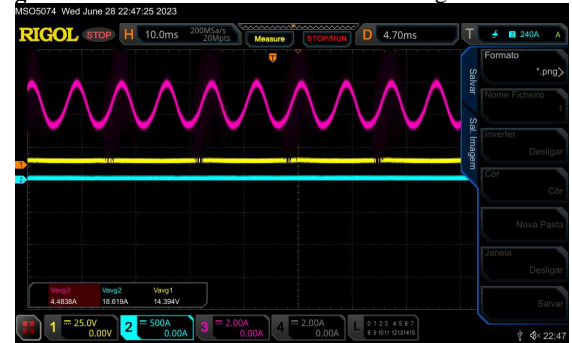
Figura 12: Ilustração do circuito.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

No lado do sistema no qual a alimentação é feita em corrente contínua, conforme é mostrado na Figura 12 e Figura 13, foram registradas as informações a seguir: Tensão na entrada do inversor de forma de onda senoidal (cor amarela) é igual a $V_{inv(in)} = 14,394V$, corrente na saída do controlador de carga (cor azul claro) é $I_{cont} = 18,619 A$ e a corrente que chega ao inversor (forma de onda na cor rosa) é igual a $I_{cont} = 4,4838 A$

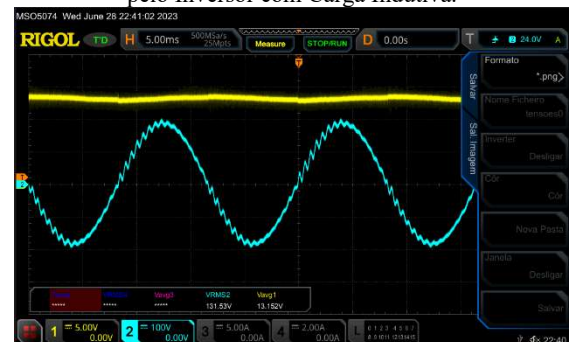
Figura 12: Corrente e Tensão Contínua Entregue ao Inversor.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A partir do Figura 13 e a tabela 3, observa-se as tensões do sistema fotovoltaico, sendo que a tensão da bateria está registrada em 13,152V e a tensão que o inversor fornece a carga é de 131,53V.

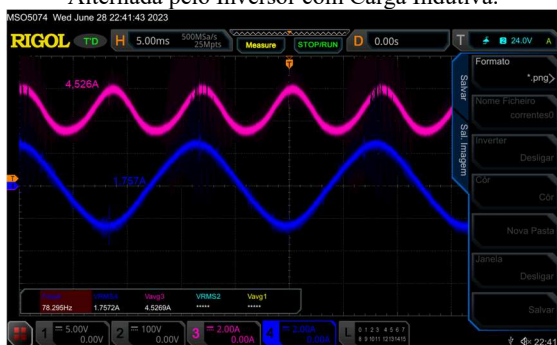
Figura 13: Conversão da Tensão Contínua em Tensão Alternada pelo Inversor com Carga Indutiva.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

A Figura 14 e a tabela 3 revelam que a corrente que chega ao inversor é de 4,526A, enquanto que a corrente alternada fornecida à carga totaliza 1,757A.

Figura 14: Conversão da Corrente Contínua em Corrente Alternada pelo Inversor com Carga Indutiva.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Nota-se na Figura 15 que em uma carga indutiva a corrente está atrasada em relação a tensão formando um ângulo de defasagem (θ) igual a 90° .

Figura 15 – Defasamento da Forma de Onda da Tensão e Corrente Alternada na Carga Indutiva.



Fonte: Elaborada pela autora (2023).

Os indutores consomem potência reativa devido à energia que é armazenada e liberada em seu campo magnético, não é direcionada para realizar tarefas úteis, contribuindo, assim, para a componente de potência reativa total no sistema elétrico. A potência reativa desempenha um papel crucial em sistemas de distribuição de energia elétrica, pois auxilia na manutenção da qualidade da tensão e na estabilidade do sistema, mas não executa as mesmas tarefas que a potência ativa, responsável pelo trabalho efetivo.

Considerações Finais

O objetivo do trabalho foi comparar e analisar o desempenho na geração de energia elétrica em uma placa fotovoltaica com diferentes cargas conectadas no sistema, visando compreender a eficiência na conversão de energia solar em energia elétrica, em um sistema off grid, ou seja, em um

sistema isolado da rede elétrica. Os resultados obtidos foram satisfatórios e promissores, permitindo a continuidade de projetos relacionados à eficiência na geração solar. Existe algumas variáveis que interferem na eficiência desse sistema, como por exemplo as altas temperaturas nas placas solares, sombreamento, manutenção inadequada, angulação das placas fotovoltaicas, cargas conectadas e etc., portanto, uma proposta para trabalhos futuros poderia ser a implementar técnicas de extração de máxima transferência de potência.

Agradecimentos

Agradeço ao IFMS/TL pelo incentivo financeiro de acordo com o Edital nº 029/2022 – IFMS/PROEN.

Referências

- ARAFAT, M. N. et al. Transition Control Strategy Between Standalone and Grid-Connected Operations of Voltage-Source Inverters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 5, p. 1516–1525, set. 2012.
- ARTALE, G. et al. Measurement of Simplified Single- And Three-Phase Parameters for Harmonic Emission Assessment Based on IEEE 1459-2010. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, 2021.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos, 2017. 2. ed. Disponível em: <https://cenariossolar.editorabrasilenergia.com.br/wp-content/uploads/sites/8/2020/11/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao_compressed.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2022. MAKKI, A.; OMER, S.; SABIR, H. Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, v. 41, p. 658–684, Jan. 2015.