

ANÁLISE OPERACIONAL DE UM MICROINVERSOR CONECTADO A UM PAINEL FOTOVOLTAICO NAS DEPENDÊNCIAS DO GEDAE/UFPA

André Felipe Pacheco Costa – pacheco_felipe97@hotmail.com

Ivan Ruy de Parijós Júnior – iparijós@ufpa.br

Mailson Borges Teles – mailsonbteles@gmail.com

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas

Resumo. Neste trabalho são apresentados resultados da operação de um microinversor em um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão. O sistema está instalado na área de testes do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA), no campus do município de Belém, no Estado do Pará e se compõe de um módulo fotovoltaico de 245 Wp e um microinversor de 215 W de potência nominal. Primeiramente é feito o detalhamento dos sistemas de geração e medição da produção energética e em seguida é apresentada a análise operacional do microinversor conectado ao gerador baseada em dados de geração coletados por quase dois anos de operação do sistema sob diferentes perfis de irradiância.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos, microinversor, Conexão à rede

1. INTRODUÇÃO

A geração distribuída tem apresentado um crescimento cada vez mais expressivo no Brasil desde 2012, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012 e regulamentou a produção independente de energia elétrica através da micro e minigeração distribuída. Com essa regulamentação, o sistema de compensação tornou possível o fornecimento da energia ativa excedente gerada para a rede de distribuição local por meio de empréstimo gratuito e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa. Nesse cenário estão inseridos os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), que têm apresentado um crescimento expressivo nos últimos anos, como pode ser observado no gráfico da Fig. 1, com informações coletadas da base de dados da ANEEL.

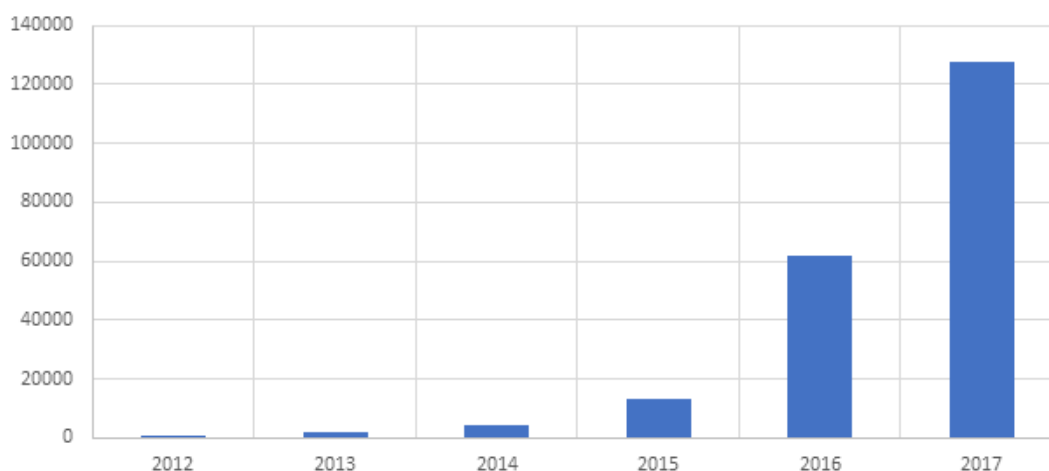


Figura 1 - Gráfico da potência fotovoltaica instalada em unidades consumidoras no Brasil desde janeiro de 2012 até setembro de 2017. (ANEEL, 2017)

Nos SFCR, os inversores desempenham um dos papéis mais importantes para o seu uso em larga escala, pois os geradores fotovoltaicos geram energia em corrente contínua e a rede elétrica convencional opera em corrente alternada a 60 Hz, sendo, portanto, necessário um dispositivo para converter a energia elétrica para os padrões da rede, função esta desempenhada pelo inversor.

Dentre as diversas topologias, a integração de um módulo e um microinversor, como se fossem um único dispositivo, vem se destacando no mercado. Nessa configuração, como há um único módulo FV para gerenciar, não haverá problemas de dispersão de parâmetros e deve-se esperar uma melhor atuação do seguidor de ponto de máxima

potência (Çelik et. al., 2017, Valentini et. al., 2008). Além disso, o sistema torna-se ainda mais modular e adequado para produção em escala, o que potencialmente pode conduzir a baixos custos de fabricação e de venda no varejo. Esta tecnologia é frequentemente vendida usando-se o argumento de ser muito apropriada para residências com baixa demanda de energia elétrica e onde o sombreamento parcial é um aspecto crítico (Dolara et. al., 2009, Paraskevadaki, 2011, Ramaprabha & Mathur, 2009, Mäki & Valkealahti, 2012). Projetado com a característica plug and play, o sistema não requer grandes conhecimentos de eletricidade para sua instalação. Porém, quando aplicado em grande escala, devido à sua característica distribuída, os requisitos de manutenção podem tornar os custos elevados, desencorajando seu uso.

O presente trabalho representa uma complementação do estudo desenvolvido em Macêdo et. al. (2014), onde são fornecidas informações sobre a operação de um SFCR com um microinversor, sendo analisados os seus aspectos produtivos e de eficiência relacionados ao sistema de geração e de conversão c.c.–c.a. Inicialmente, faz-se uma descrição detalhada do microsistema e posteriormente apresentam-se alguns resultados obtidos em 20 meses de operação do sistema.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema estudado é constituído por um gerador FV de 245 Wp, que por sua vez se compõe de um único módulo de 60 células em série, e um microinversor de 215 W interligado em um barramento da rede elétrica de 220 Vc.a. O gerador FV está instalado em uma estrutura no solo com uma inclinação de aproximadamente 12° orientado para o norte geográfico. A seguir são fornecidas mais informações sobre os vários componentes do sistema, incluindo estrutura, microinversor e monitoração.

2.1 Estrutura

Para compor o gerador FV foi utilizado um módulo modelo Aleo S19G245, com potência de 245 Wp. As características elétricas nominais do módulo são apresentadas na Tab. 1, onde P é a potência nominal, I_{sc} é a corrente de curto-circuito, V_{oc} é a tensão de circuito aberto, η é a eficiência, I_{mp} e V_{mp} são respectivamente a corrente e a tensão no ponto de máxima potência, α é o coeficiente da variação da corrente de curto circuito com a temperatura, β é o coeficiente da variação da tensão de circuito aberto com a temperatura e γ é o coeficiente de variação da potência com a temperatura.

Tabela 1 - Características elétricas do módulo FV utilizado.

P = 245 Wp	$\eta = 14,60 \%$	$\alpha = + 0,04 \%/^{\circ}\text{C}$
$I_{sc} = 8,1 \text{ A}$	$I_{mp} = 8,66 \text{ A}$	$\beta = - 0,31 \%/^{\circ}\text{C}$
$V_{oc} = 30,2 \text{ V}$	$V_{mp} = 37,7 \text{ V}$	$\gamma = + 0,44 \%/^{\circ}\text{C}$

A estrutura de sustentação para o gerador FV utiliza perfis de alumínio de $1.1/2'' \times 3/16''$ fixados a um bloco de concreto e projetada para permitir a variação angular, cuja regulação é feita por duas barras chatas de alumínio de $1'' \times 1/4''$. Para a inclinação do gerador, deve-se levar em conta a latitude do local de instalação. A cidade de Belém está a uma latitude de $1^{\circ}27'$, e a inclinação escolhida para o gerador foi de aproximadamente 12°, orientada para o norte geográfico, visando também minimizar o acúmulo de sujeira na parte superior do gerador FV.

Para melhor ilustrar o projeto da estrutura, o lado esquerdo da Fig. 2 foi dividido em quatro partes, onde a primeira mostra uma visão geral da estrutura. Em “A” está detalhada a forma de fixação da estrutura na base de concreto (parafusos do tipo rosca soberba e buchas); em “B” está apresentada a cantoneira em alumínio utilizada para fixar o módulo na estrutura, confeccionada de tal forma que possa deslizar sobre o perfil, permitindo que sejam testados diversos tipos de módulos com diferentes dimensões; e em “C” mostra-se o mecanismo de variação angular do suporte do módulo. O projeto completo da estrutura, já mostrando o módulo FV é apresentado na Fig. 2 (D).

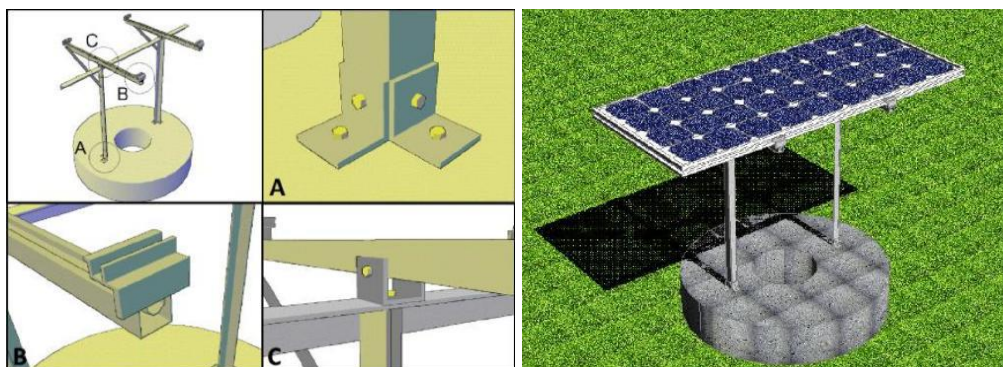


Figura 2 - (A) Fixação da base; (B) Suporte do módulo; (C) Variação angular; (D) Projeto da estrutura.

2.2 Microinversor e medidores

Para conversão de energia c.c. para c.a. utiliza-se um microinversor modelo Enphase M215, cuja potência de entrada é compatível com a fornecida pelo gerador FV. As principais características técnicas são: potência nominal de 215 W, tensão de saída entre 211 a 264 V, frequência entre 59,3 e 60,5 Hz, fator de potência maior que 0,95 e eficiência de pico da ordem de 96 % a uma temperatura ambiente de 25 °C.

2.3 Diagrama unifilar do sistema

Duas lâmpadas incandescentes de 100 W foram instaladas na interface entre a saída do microinversor e a entrada da rede elétrica, objetivando simular o consumo de energia ativa em uma residência, além de medidores eletrônicos unidirecionais modelo Mecaf SMT1015, para medir a energia produzida diariamente pelo microsistema bem como a demandada da rede elétrica local quando há o acionamento das lâmpadas. O diagrama unifilar do circuito do SFCR está representado na Fig. 3.

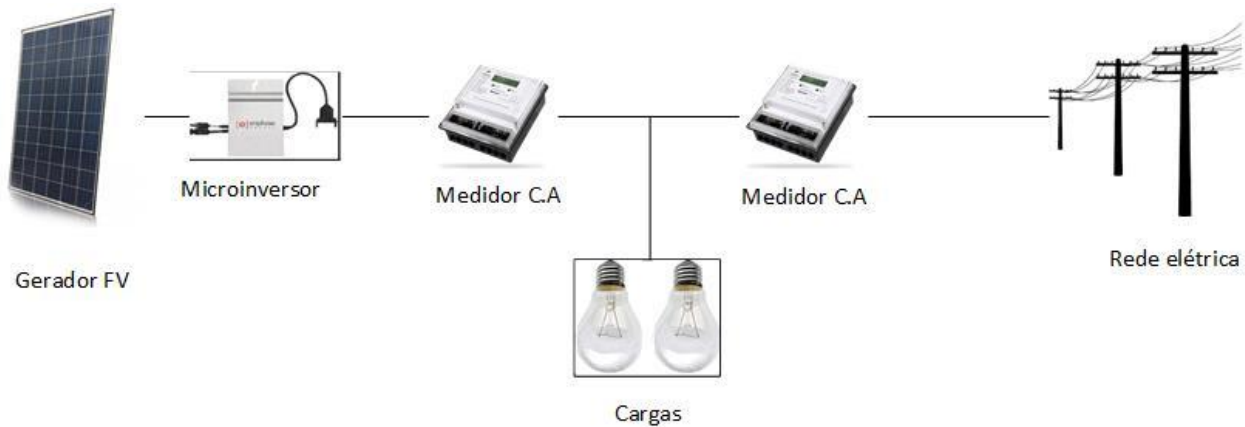


Figura 3 - Diagrama unifilar do sistema.

3. RESULTADOS PRELIMINARES

Neste capítulo estão apresentados alguns dados sobre o sistema em estudo obtidos em Macêdo et. al. (2014).

3.1 Eficiência do módulo

O cálculo da eficiência média diária do módulo FV foi realizado de acordo com a Eq. (1).

$$\eta_{med\ inv} = \frac{\int_{t_2}^{t_1} P_{saídaPV} dt}{\int_{t_2}^{t_1} H_{t,\beta} dt} \quad (1)$$

O numerador da Eq. (1) representa a energia elétrica total gerada pelo módulo FV obtida da integração da potência c.c. durante o intervalo de operação considerado. O denominador é o valor da energia solar incidente sobre o gerador FV, que é calculado integrando-se a irradiância incidente sobre a área do módulo (área útil = 1,41 m² e área total = 1,64 m²) no mesmo período. O gráfico com as eficiências médias diárias das células (área útil) e do módulo (área total) no período de 17/10/2013 a 30/10/2013 é apresentado na Fig. 4. É possível observar que os valores das eficiências médias diárias das células do módulo estão entre 14,6 % e 15,9 %, com médias de 15,1 %, enquanto esses valores para a área total do módulo estão entre 12,6 % e 13,7 %, com valor médio de 13,0 %.

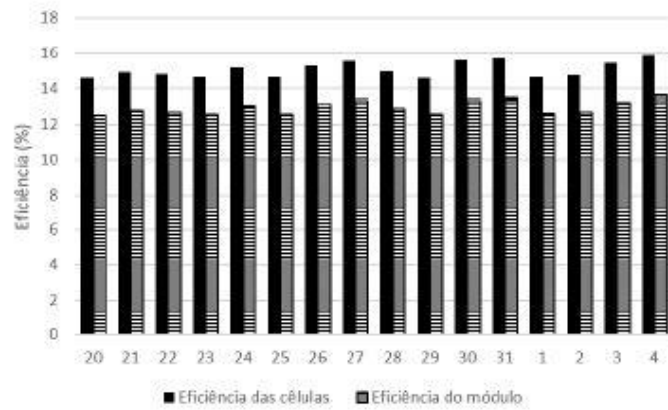


Figura 4 - Eficiência média diária considerando a área das células e total do módulo.

3.2 Eficiência do inversor

Uma característica importante de ser analisada em sistemas conectados à rede é a eficiência do inversor. O cálculo da eficiência instantânea desse equipamento é definido como sendo a relação entre a potência ativa c.a. e a potência c.c., como mostra a Eq. (2).

$$\eta_{inv} = \frac{P_{saída\ inv}}{P_{saída\ PV}} \quad (2)$$

A eficiência desse equipamento está relacionada basicamente com duas variáveis: o seu carregamento e a sua temperatura de operação. O carregamento é definido como a relação entre a potência ativa c.a. ($I_{ca} \cdot V_{ca}$) e a sua potência nominal (P_{INV}^0) como mostrado na Eq. (3).

$$C_{inv} = \frac{I_{ca} \cdot V_{cc}}{P_{inv}^0} \quad (3)$$

A Fig. 5 apresenta o desempenho do microinversor por meio da sua curva de eficiência em função do carregamento.

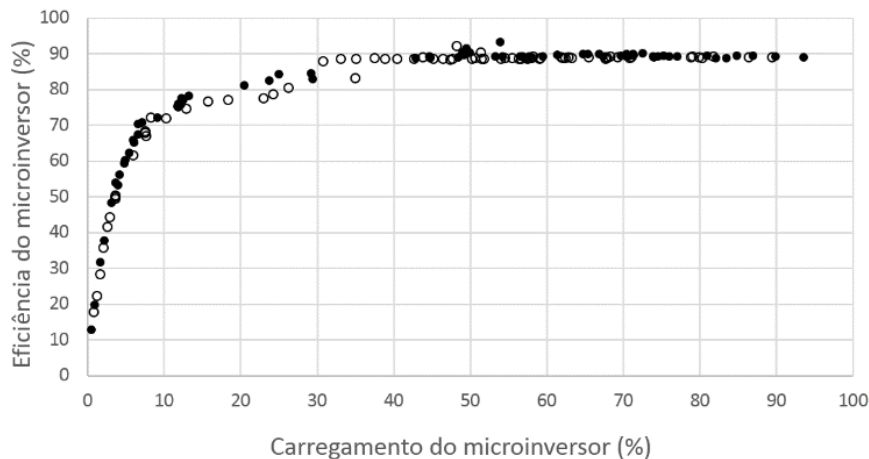


Figura 5 - Eficiência do microinversor em função de seu carregamento.

Na Fig. 5, os círculos negros representam os valores medidos entre 06h00 e 12h00 enquanto os círculos brancos são valores entre 12h00 e 18h00. Nesse gráfico ficam claras as duas regiões de operação do microinversor: com carregamentos até 30 % as eficiências possuem níveis variados e acima de 30 % ela é praticamente constante.

A eficiência média diária do microinversor pode ser calculada pela Eq. (4):

$$\eta_{med\ inv} = \frac{\int_{t_2}^{t_1} P_{saída\ inv} dt}{\int_{t_2}^{t_1} P_{saída\ PV} dt} \quad (4)$$

Onde $P_{\text{Saída INV}}$ e $P_{\text{Saída FV}}$ representam as potências entregues à rede pelo microinversor e produzida pelo gerador FV, respectivamente. A Fig. 6 apresenta os valores de eficiência média para os dias analisados no período de 20/10/2013 a 04/11/2013.

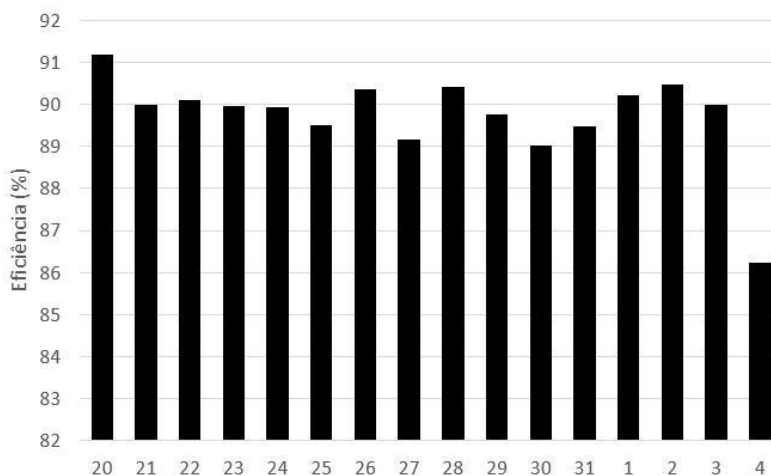


Figura 6 - Eficiência média diária do microinversor.

Nota-se que o dia 04/11 apresentou uma eficiência média consideravelmente abaixo das outras. Esse fato é explicado pela irradiação baixa distribuída ao longo do dia, fazendo com que o inversor operasse com baixo carregamento por um período considerável de tempo. O valor médio das eficiências médias diárias para os dias em questão foi de 89,7 %.

4. RESULTADOS

A partir desses dados preliminares, foi possível dar prosseguimento às medições de geração c.a do sistema em questão e analisar o seu desempenho nas condições climáticas de Belém.

4.1 Parâmetros de desempenho de SFCRs

A seguir serão detalhados os parâmetros utilizados para caracterizar o desempenho do sistema fotovoltaico em questão.

4.1.1 Energia Produzida

A energia produzida é dada pela soma das parcelas de energia geradas pelo sistema fotovoltaico ao longo do tempo. O foco principal foi caracterizar o sistema em termos de sua produção de eletricidade ao longo dos anos e seus valores médios mensais.

4.1.2 Produtividade de Referência (Y_R)

A produtividade de referência (do inglês, Reference Yield – Y_R) representa a relação entre a quantidade de irradiação total incidente no plano do gerador em kWh/m² por unidade de irradiação de referência (geralmente 1 kW/m²). Esse parâmetro expressa o número de horas de sol pleno, ou seja, o equivalente energético à quantidade de horas a uma irradiação de 1000 W/m². Y_R define o recurso solar para o sistema fotovoltaico, que pode variar de acordo com a localização, com a orientação do gerador FV e com as variações mensais e anuais das condições climáticas (Almeida, 2012).

4.1.3 Produtividade Final (Y_F)

A produtividade final (do inglês, Final Yield – Y_F) de um sistema fotovoltaico é a relação da energia elétrica gerada em corrente alternada inserida na rede e a potência nominal do gerador nas condições padrão de teste (STC) informada pelo fabricante. A sua dimensão pode ser escrita em kWh/kWp ou em horas, já que a produtividade final denota a quantidade de horas de sol pleno efetivamente convertidas em energia elétrica pelo sistema fotovoltaico, ao levar em considerações as perdas associadas a ele, sendo assim possível notar que a produtividade final será menor que a produtividade de referência para um mesmo período de tempo. Se o sistema não tivesse qualquer tipo de perdas, a produtividade final teria seu valor idêntico ao da produtividade de referência. (Zilles et al., 2012).

A produtividade final é um bom indicador para acompanhar o desempenho de sistemas FV que se encontram instalados próximos uns dos outros e que possuam a mesma, ou diferente, estrutura de montagem, desde que estejam sujeitos à mesma angulação, já que a irradiação afetará diretamente o seu valor. Portanto, não será válida uma comparação entre sistemas instalados em localidades ou sob distintos efeitos de sombreamento.

4.1.4 Rendimento Global (PR)

O rendimento global (do inglês Performance Ratio – PR) é um valor adimensional que mostra o efeito total de perdas e falhas em um sistema fotovoltaico, indicando o quanto sua operação se aproxima da ideal ($PR = 1$). Permite comparar sistemas independentemente da localização geográfica, posicionamento do gerador FV e potência nominal, pois normaliza a produtividade em relação à irradiação (Almeida, 2012).

4.2 Análise dos Resultados

A monitoração da geração do sistema fotovoltaico conectado à rede foi realizada durante um total de 20 meses, totalizando 609 dias de dados analisados. Esse item apresenta a análise dos resultados operacionais do sistema com base nos parâmetros de desempenho apresentados anteriormente na seção 4.1.

4.2.1 Energia Gerada

Ao final da monitoração, o sistema havia gerado um total de 606,56 kWh, resultando em uma média de 1,01 kWh gerados por dia. A maior geração foi apresentada no dia 18 de setembro de 2015, com um valor de 1,38 kWh e a menor no dia 2 de abril de 2016, com um valor de 0,24 kWh. A fig. 7 e a fig. 8 apresentam a produção diária de eletricidade ao longo dos meses e a geração média mensal diária, respectivamente.

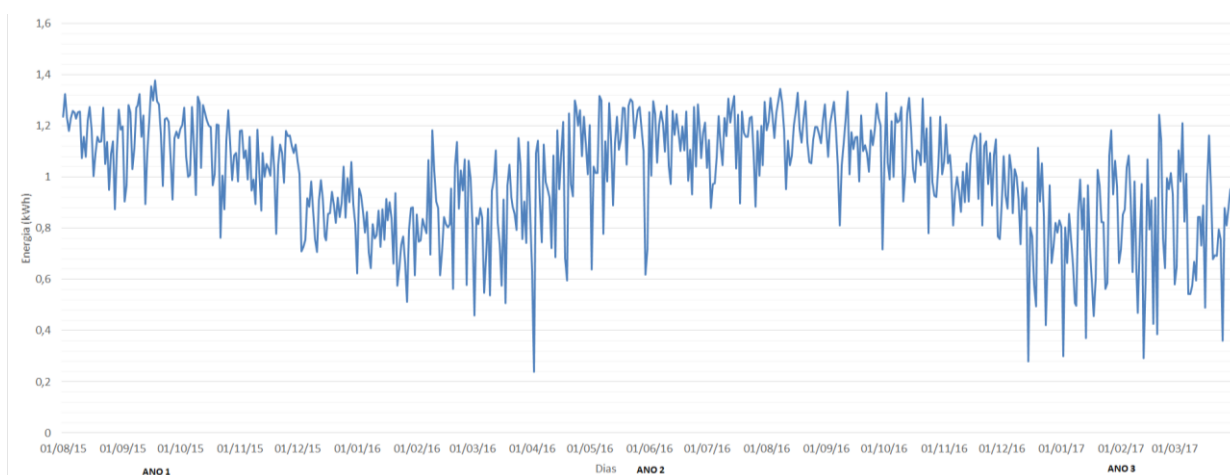


Figura 7 – Geração energética diária

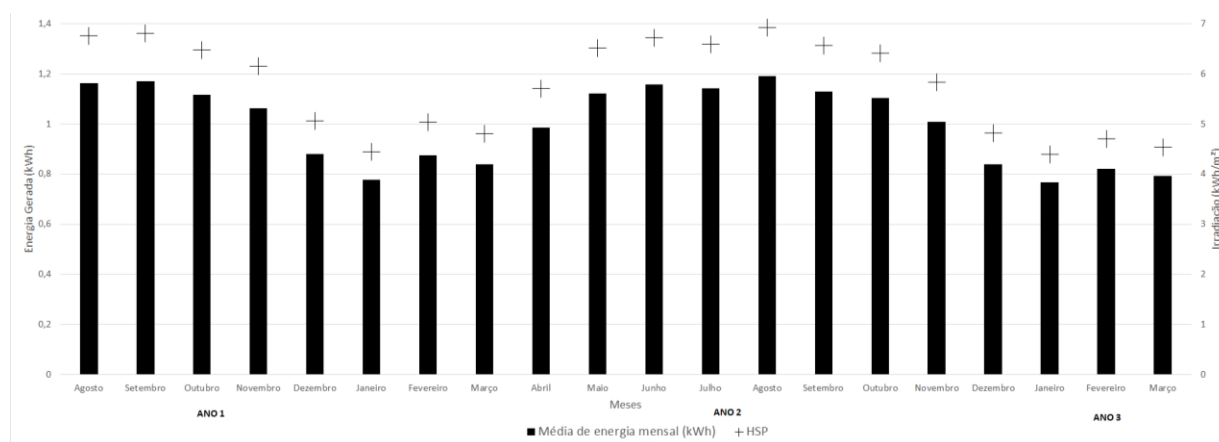


Figura 8 – Geração diária mensal energética média e horas de sol pleno

A partir dos gráficos, é visível a correlação das horas de sol pleno com a geração energética para o determinado período, além de ser interessante notar o ciclo de irradiação típico de Belém ao longo dos meses observando o período

de chuvas mais constantes (dezembro a abril) e o de insolação mais intensa (maio a novembro), conforme comprova o Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et. al., 2006).

4.2.2 Produtividade e rendimento do sistema

O sistema apresentou uma produtividade anual para 2016 de 1.513,5 kWh/kWp para uma irradiação anual de 2145,13 kWh/m². Já em relação à produtividade mensal, obteve-se uma média de 123,71 kWh/kWp com valor máximo de 150,65 kWh/kWp no mês de agosto de 2016 e o seu valor mínimo de 93,71 kWh/kWp no mês de fevereiro de 2017. A distribuição da produtividade mensal pode ser observada na Fig. 9.

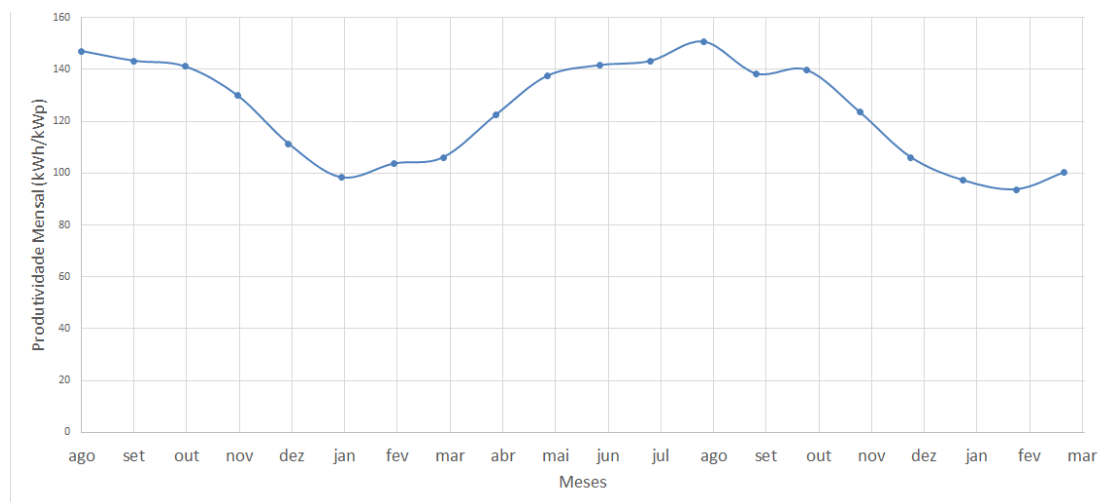


Figura 9 – Produtividade Mensal do sistema ao longo dos meses.

Em relação ao rendimento global mensal, o sistema apresentou uma variação entre 70,18 % para agosto de 2016 e 71,84 % para janeiro de 2017, resultando em uma média de 70,78 % entre os meses. Na Fig. 10 nota-se que o rendimento global se comporta inversamente proporcional à irradiação mensal. A esse efeito foi atribuído a causa da limitação por temperatura, já que em uma maior irradiação, o gerador e o inversor estariam operando por mais tempo a uma alta temperatura, comprometendo a eficiência do módulo e do inversor (Almeida, 2012), o que também ocasiona diminuição no rendimento global do sistema.

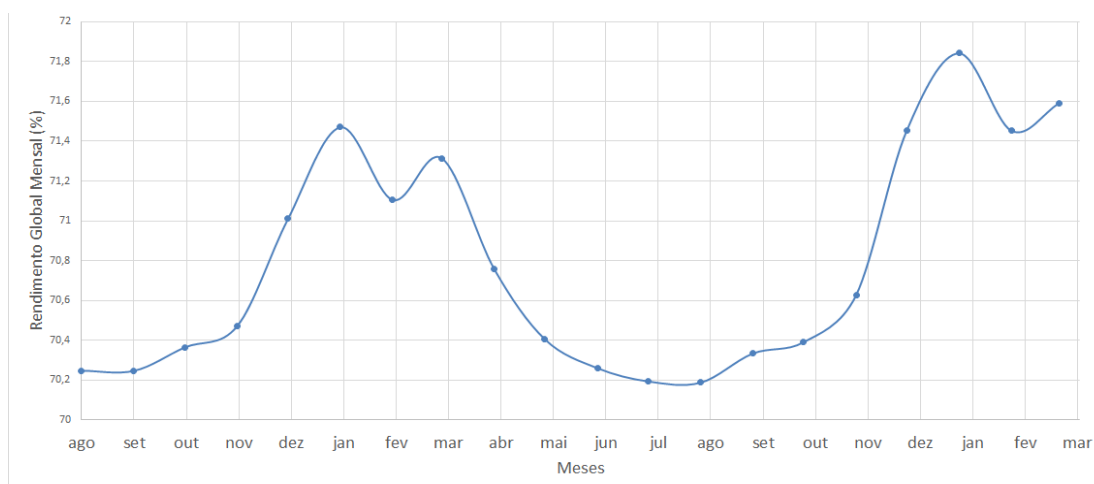


Figura 10 – Rendimento Global do sistema ao longo dos meses.

5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou os resultados de operação para um SFCR instalado na cidade de Belém-PA e representa a complementação do estudo preliminar desenvolvido em Macêdo et. al. (2014).

O sistema apresentou um bom rendimento, como pode ser visto na análise de rendimento global do sistema, e uma notável influência de fatores como temperatura no rendimento global do sistema fotovoltaico. A produtividade obtida de 1.513,5 kWh/kWp é considerada muito significativa, comprovando a aplicabilidade desses sistemas para suprir pequenos consumidores de energia.

Por fim, dados e informações reais de operacionalidade de sistemas fotovoltaicos em diferentes situações têm importância cada vez maior, pois a determinação de instalação de geradores em localidades próximas se torna mais simples e eficiente, além de servir como referencial para futuros estudos de instalações localizadas nas proximidades do sistema analisado.

Autorizações e reconhecimentos

Autorizamos a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudos e pesquisa, desde que citada a fonte.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.
- ALMEIDA, M. P. Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 2012. 171 p. Dissertação (Mestrado– Programa de Pós-Graduação em Energia)–EP/FEA/IEE/IF da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2012.
- Cavalcante, R. L.. Análise de dois Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica do Campus Universitário da UFPA, na Cidade de Belém/PA, Trabalho de Conclusão de Curso, FEE, ITEC, UFPA, Belém, 2011.
- Çelik, Ö.; Teke, A.; Tan, A. Overview of micro-inverters as a challenging technology in photovoltaic applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 3 November 2017.
- Dolara, A.; Lazaroiu, G. C.; Leva, S.; Manzolini, G.. Experimental investigation of partial shading scenarios on PV (photovoltaic) modules. *Energy* (2013), <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.009>.
- Macêdo, W. N. Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Tese de Doutorado, PIPGE, USP, São Paulo, 2006.
- Macêdo, W. N.; Cavalcante, R. L.; Junior, W. B.; Galhardo, M.; Pinho, J. T.. Contribuição Energética e Análise de Perdas de Conversão cc-ca em uma Aplicação Fotovoltaica Conectada à Rede Elétrica na UFPA. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES – São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012.
- Macêdo, W. N.; Torres, P. F.; Pontes, S. S. N.; Braga, W. J.; Cavalcante, R. L.; Galhardo, M. A. B.; Pinho, J. T. Análise da eficiência de um microinversor conectado à rede elétrica. V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Recife, 31 a 03 de abril de 2014.
- Mäki A, Valkealahti S. Power losses in long string and parallel-connected short strings of series-connected siliconbased photovoltaic modules due to partial shading conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2012;27(1):173e83.
- Paraskevadaki, E.V.; Papathanassiou, S.A.. Evaluation of MPP voltage and power of mc-Si PV modules in partial shading conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2011; 26(3):923e32.
- Pereira, E. B.; Martins, F. R.; Abreu, S. L.; Rüther, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2006. 34 p.
- Ramaprabha R.; Mathur B.L.. Impact of partial shading on solar PV module containing series connected cells. *International Journal of Recent Trends in Engineering* 2009;2(7):56 e 60.
- Teles, M. B.; Rodrigues, M. J. S.; Cavalcante, R. L.; Pinho, J. T.; Macêdo, W. N.; Oliveira, L. G. M. Análise do desempenho de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica instalados na região norte do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 6. 2016, Belo Horizonte-MG. Anais... Belo Horizonte-MG: Associação Brasileira de Energia Solar-ABENS, 04 a 07 de abril de 2016.
- Valentini, M.; Raducu, A.; Sera, D.; Teodorescu, R.. PV Inverter Test Setup for European Efficiency, Static and Dynamic MPPT Efficiency Evaluation. 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp. 433-438, 2008.
- Wang, F. Flexible Operation of Grid-Interfacing Converters in Distribution Networks: Bottom-up Solutions to Voltage Quality Enhancement, PhD Thesis, Eindhoven University of Technology, 2010.

OPERATIONAL ANALYSIS OF A MICROINVERTER CONNECTED TO A PHOTOVOLTAIC PANEL IN GEDAE / UFPA DEPENDENCIES

Abstract. *In this paper results of the operation of a microinverter in Grid-Connected PV Systems are presented. The system is installed in the test area of the Group of Studies and Development of Alternative Energies (GEDAE) at the Federal University of Pará (UFPA), in the campus of the municipality of Belém, in the state of Pará, and is composed of a photovoltaic module of 245 Wp and a micro-inverter of 215 W nominal power. First, the energy generation and measurement systems are detailed, and then the operational analysis of the microinverter connected to the generator is made based on generation data collected for almost two years of operation of the system under different irradiation profiles.*

Key words: *PV systems, microinverter, Grid-connection*