

RESULTADOS EXPERIMENTAIS DE 8 MESES DE OPERAÇÃO DE UM SFCR

Marinaldo de Jesus dos Santos Rodrigues – marinaldorodrigues402@yahoo.com

Mailson Borges Teles – mailsonbteles@gmail.com

Keila Cristina dos Santos Maia – keila@ufpa.br

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

Resumo. Este trabalho mostra alguns resultados de 8 meses de operação de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão (SFCR). O gerador FV de tecnologia monocristalina está instalado na área de teste do Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA). Durante quatro meses, o sistema operou com sete módulos fotovoltaicos de 240 Wp e os outros 4 meses com oito módulos de 240 Wp. Primeiro é analisada a produção de energia para todo período e a energia produzida dia-a-dia com o gerador de 1.68 kWp e com o gerador de 1.92 kWp. Após essa análise é realizada um estudo da eficiência de seguimento do ponto de máxima potência para vários níveis de radiação. E por fim é mostrado a produtividade média mensal, a produtividade de referência, as perdas por captura e o rendimento global do sistema.

Palavras-chave: Energia solar, Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede elétrica (SFCRs) compõem a aplicação da energia solar que vem apresentando a maior taxa de crescimento anual no mundo. No Brasil esse crescimento se dá por um conjunto de fatores, que dentre eles pode-se destacar: a redução do preço dos módulos fotovoltaicos no âmbito internacional, a divulgação e pesquisa nos meios acadêmicos e empresarial e a regulamentação de Normas Técnicas Nacionais para conexão à rede e instalações elétricas de sistemas fotovoltaicos. Uma vez instalados, os SFCRs são influenciados por diversos fatores, tanto em relação à tecnologia propriamente dita, quanto em relação a: intensidade da irradiância, temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos e o sombreamento parcial causado por árvores, sujeira, prédios, etc. As perdas por associação entre módulos de um mesmo *string*, conhecido como *mismatch loss*, estão relacionados com a tecnologia empregada e com a incidência não uniforme de radiação solar no plano do gerador FV. Esse efeito causa a diminuição da potência total do sistema comparada com a soma das potências individuais de todos módulos associados devido às diferenças elétricas entre eles. As instalações de sistemas fotovoltaicos em áreas urbanas frequentemente estão sujeitas a sombras projetadas por prédios, postes torres ou árvores. Desta forma, este trabalho visa mostrar o desempenho de um gerador fotovoltaico (FV) instalado na área de teste do GEDAE onde utilizou-se as principais figuras de mérito tais como: Produtividade média mensal, Rendimento Global (*performance ratio*), etc. Inicialmente apresentam-se os dados de placa dos módulos fotovoltaicos e do inversor, a configuração do sistema e também é apresentado o sistema de aquisição de dados utilizado. Como o sistema de aquisição não conta com todas as medições necessárias para avaliação pretendida nesse estudo, optou-se pela simulação do gerador fotovoltaico no programa CREARRY para o desenvolvimento de algumas análises, onde os dados de entrada (temperatura e irradiância) usados para alimentar o programa correspondem a dados reais.

2. DESCRIÇÃO DO GERADOR FOTOVOLTAICO

O gerador FV, em princípio, foi montado com sete módulos de tecnologia monocristalino de 240 Wp (watt-pico) conectados em série com uma potência de pico de 1.680 Wp (watt-pico) como se pode observar na Fig. 1. Cada módulo é constituído de 60 células fotovoltaicas. Os dados técnicos do módulo são descritos na Tab. 1.

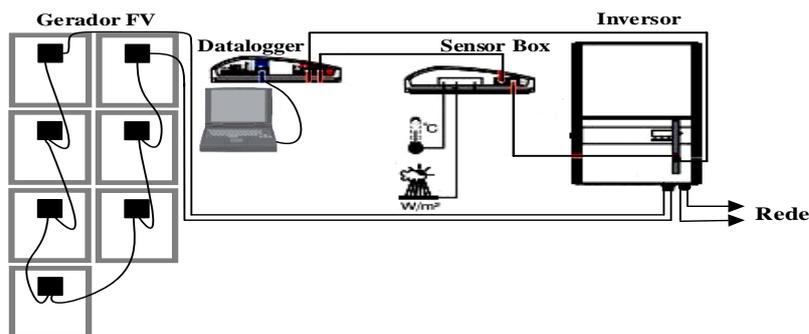


Figura 1 - Esquema de ligação do Gerador FV.

Tabela 1 - Especificações elétricas do módulo ALEO S-19.

CARACTERÍSTICA	VALOR
Máxima Potência	240 W
Tensão de Máxima Potência	30,45 V
Corrente de Máxima Potência	7,93 A
Tensão de Circuito Aberto	37,9 V
Corrente de Curto-Circuito	8,49 A

A estrutura para fixação dos módulos é composta de madeira e perfis de alumínio, tal como mostrado na Fig. 2. Tal estrutura foi confeccionada de forma proposital, a fim de verificar o custo-benefício de uma estrutura desse tipo, haja vista que a maioria dos telhados da cidade de Belém-PA são compostos de madeira. Dessa forma pode-se ter uma ideia da durabilidade da madeira em estruturas de sustentação de um gerador FV.



Figura 2 - Estrutura do gerador FV e Sensor de Irradiância.

Na Fig. 2 também se pode observar o sensor de irradiância tipo célula, cujo o modelo é o “Spektron 210” e que apresenta as seguintes características: faixa de medição (0 – 1.500 W/m²), erro associado as medições, média anual ($\pm 5\%$). Ele fornece uma tensão proporcional à intensidade da irradiância solar com aproximadamente 75 mV correspondendo a 1.000 W/m², vale ressaltar que o sensor está fixado a mesma inclinação que gerador (10°).

Na Tab. 2 são apresentados os dados de placa do inversor Fronius IG 30 de potência nominal de 2,85 kW.

Tabela 2 - Especificações elétricas do inversor Fronius IG 30

CARACTERÍSTICA	VALOR
Faixa de tensão de entrada na máxima potência	150-400 V
Corrente máxima de entrada	19,0 A
Faixa de tensão de saída	180-270 V
Potência elétrica nominal	2.850 W
Potência elétrica máxima de saída	2.650 W
Corrente nominal de saída	11,5 A
Máxima eficiência	94,3%

2.1 Monitoramento do Sistema Fotovoltaico

Com o intuito de se ter uma confiabilidade nos dados de radiação medida pela célula fotovoltaica, optou-se por realizar uma comparação com a radiação estimada através de programas computacionais. Apresentam-se na Fig. 3(A) os dados medidos e os dados obtidos através da simulação. Os *softwares* utilizados nesse trabalho foram CREARRY, PVSyst e o RADIASOL 2 (UFRGS), vale ressaltar que tanto a radiação medida como a simulada são para um plano inclinado de 10°.

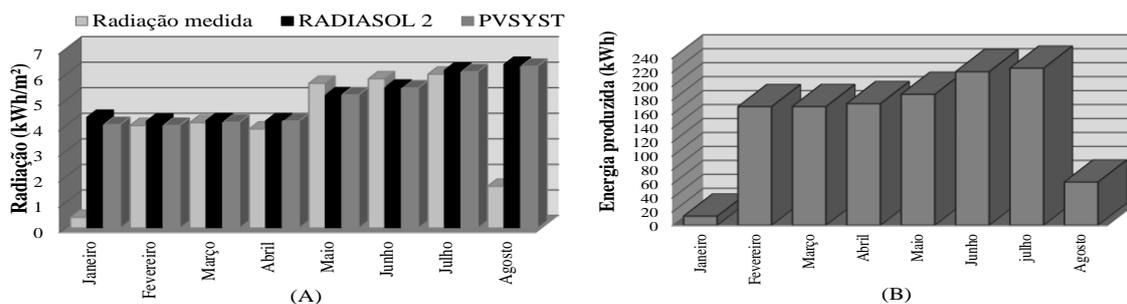


Figura 3 - Dados de radiação solar: (A) Comparação entre a radiação medida e simulada, (B) Produção de energia entregue a rede elétrica.

Nota-se que há uma boa aproximação entre os dados medidos e calculados, a não ser para os meses de janeiro e agosto, em função do número reduzido de dias de operação do sistema. A energia produzida para os meses de fevereiro a julho varia entre 160 e 220 kWh.

2.2 Produção de Energia do Gerador FV

A primeira análise realizada foi a do desempenho do SFCR em termos da energia produzida. A Fig. 3(B) mostra a quantidade de energia produzida evidenciando a baixa produtividade nos meses de janeiro e agosto. A produção do mês de janeiro foi pequena haja vista que o gerador foi conectado à rede elétrica no dia 29/01 às 15:00h, com uma contribuição de energia de 13.01 kWh (ou 1,06% do total de geração). Para o mês de agosto teve-se também uma baixa contribuição de energia, isso se deve ao fato da operação do sistema ter ido até o dia 08/08. Nesse mês foram gerados 61.87 kWh (ou 5,06% do total de energia produzida). A geração a partir de junho contou com a inserção de um módulo a mais passando de 1.680 Wp para 1.920 Wp. Entretanto, para essa análise é necessário verificar a produção de energia dia-a-dia, a Fig. 4(A) mostra a geração do mês de maio e junho.

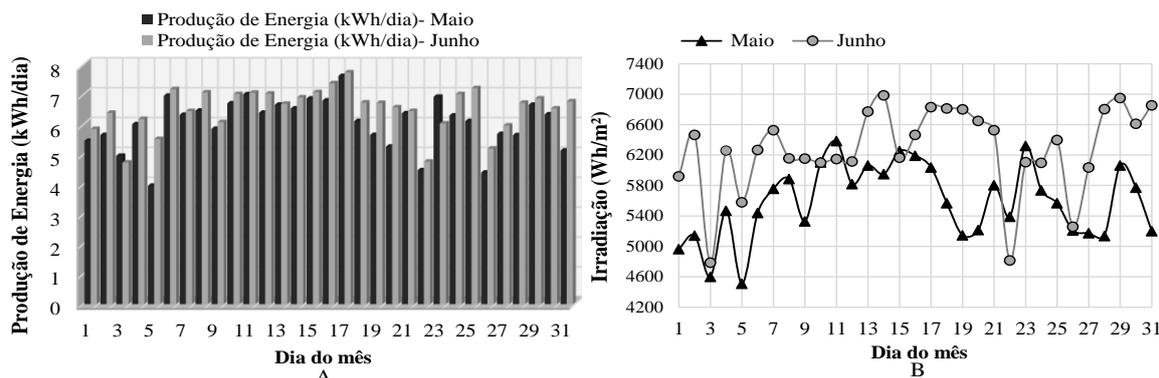


Figura 4 - Dados da produção de energia e irradiação: (A) Produção de energia nos meses de maio e junho, (B) Irradiância dos dias de maio e junho.

Na Fig. 4(B) observa-se os níveis de irradiação correspondentes aos meses de maio e junho. Nota-se que, para o dia 15 de cada mês, a irradiação incidente no plano do gerador FV foi de aproximadamente 6.200 Wh/m², implicando em níveis de geração de energia elétrica aproximados. A Fig. 5 mostra o perfil da produção de energia elétrica do dia 15, bem como a geração acumulada para ambos os meses. Pode-se notar que entre as 6 e 9 horas da manhã o gerador fotovoltaico é afetado pelo sombreamento de uma árvore. Já no período da tarde o sombreamento é causado pela própria edificação do laboratório do GEDAE.

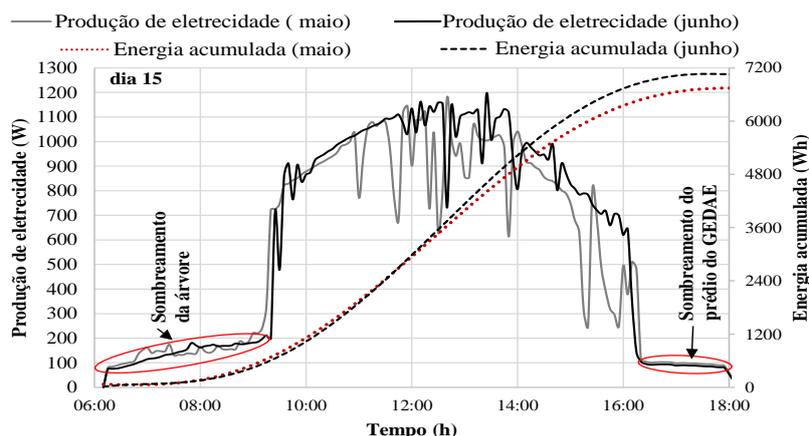


Figura 5 - Produção de eletricidade e geração acumulada do dia 15.

Na Fig. 6 é mostrada a curva de produção de energia do dia 26, na qual também se observa os sombreamentos causados pela árvore e o prédio do GEDAE. A energia acumulada desse dia para o mês de maio e junho foi de 5.200 Wh e 4.400 Wh, respectivamente.

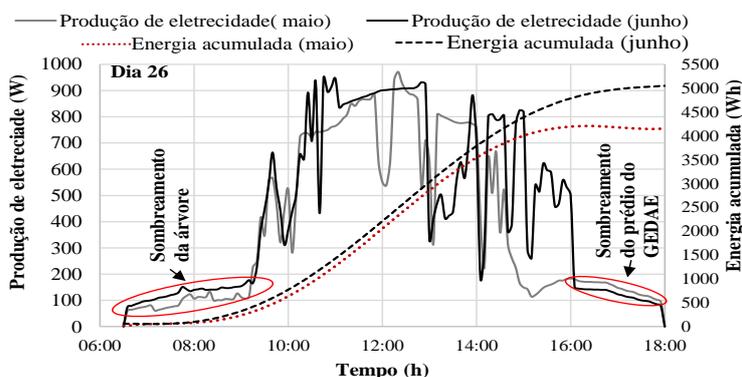


Figura 6 - Produção de eletricidade e geração acumulada do dia 26.

A Fig. 7(A) mostra o perfil de potência entregue a rede elétrica e o perfil de energia acumulada (7.892 kWh). Pode-se observar que o gerador começou a injetar potência na rede a partir das 6:00h30min e termina por volta das 18:00hs.

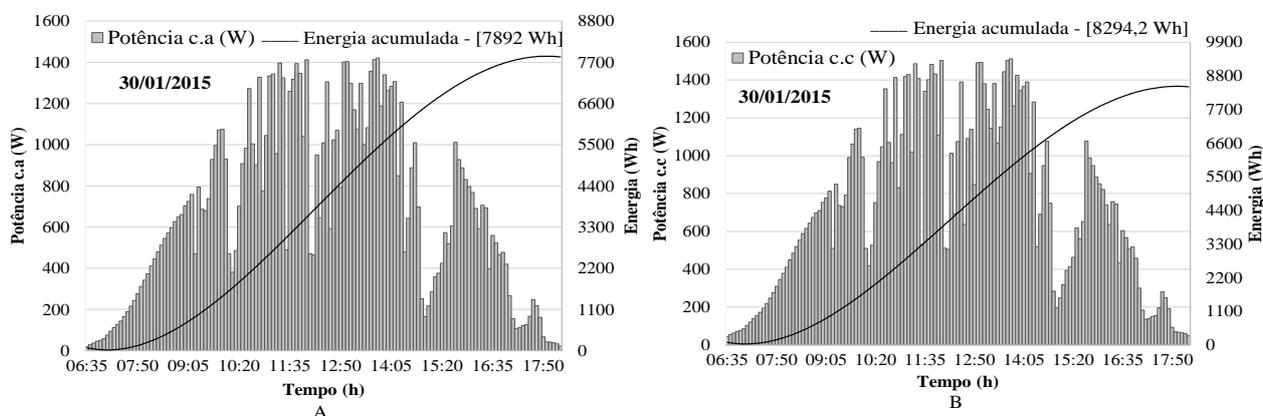


Figura 7 - (A) Potência entregue a rede elétrica, (B) Potência entregue ao inversor.

A potência entregue ao inversor pode ser observada na Fig. 7(B), bem como o perfil de energia acumulada com um total de 8.294,2 Wh. Com base nos valores de energia c.c. e c.a. do dia 30/01/2015 é possível calcular uma eficiência média de conversão do inversor de aproximadamente 95%. O comportamento da irradiância para o mesmo dia é mostrado na Fig. 8 com um total de irradiância de 5.664 Wh/m².

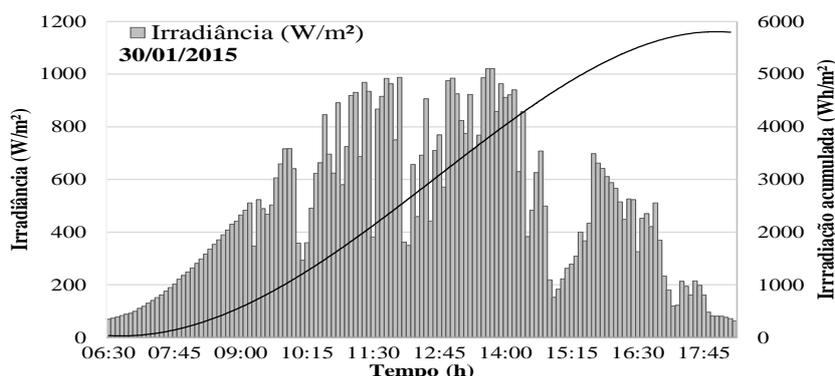


Figura 8 - Perfil de irradiância do dia 30 de janeiro.

Analisando a Fig. 7(B) e Fig. 8 pode-se calcular a Eficiência de conversão fotovoltaica média (η_{FV}) dada em porcentagem, definida pela razão entre a energia entregue pelo gerador FV (E_{cc}) e a irradiância total incidente no plano do gerador (G_s) multiplicado pela sua área (A_G), tal como indica a Eq. (1). Substituindo os valores obtidos na Fig. 7(B) e Fig. 8 tem-se uma Eficiência fotovoltaica média para o dia 30/01/2015 de 12,25%.

$$\eta_{FV} = \left[\frac{E_{cc}}{G_s \times A_G} \right] \times 100 = \frac{8.294,2}{5.764 \times 11,752} \times 100 = 12,25\% \quad (1)$$

Outro parâmetro utilizado para avaliação do desempenho do gerador FV é a Eficiência do Ponto de Máxima Potência (η_{SPMP}) dada em porcentagem, definido pela razão entre a energia obtida pelo inversor de um dado gerador fotovoltaico e a energia que poderia ser obtida desse mesmo gerador se o inversor fosse munido de um sistema de Seguimento do Ponto de Máxima Potência (SPMP) ideal, dada pela Eq. (2) de acordo com (Zilles, 2012).

$$\eta(SPMP) = \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} PFV dt}{\int_{t_1}^{t_2} P_{mp} dt} \right] \quad (2)$$

Para avaliar esse parâmetro apresenta-se na Fig. 9 a curva do gerador FV e a Eficiência de Seguimento do Ponto de Máxima Potência. A curva gerada corresponde ao período da manhã no primeiro dia de operação do gerador. A potência calculada (em azul) corresponde ao valor teórico ideal, obtida através do programa CREARRAY, onde os dados de entrada do programa (irradiância e temperatura) são dados medidos pelo sistema de aquisição de dados.

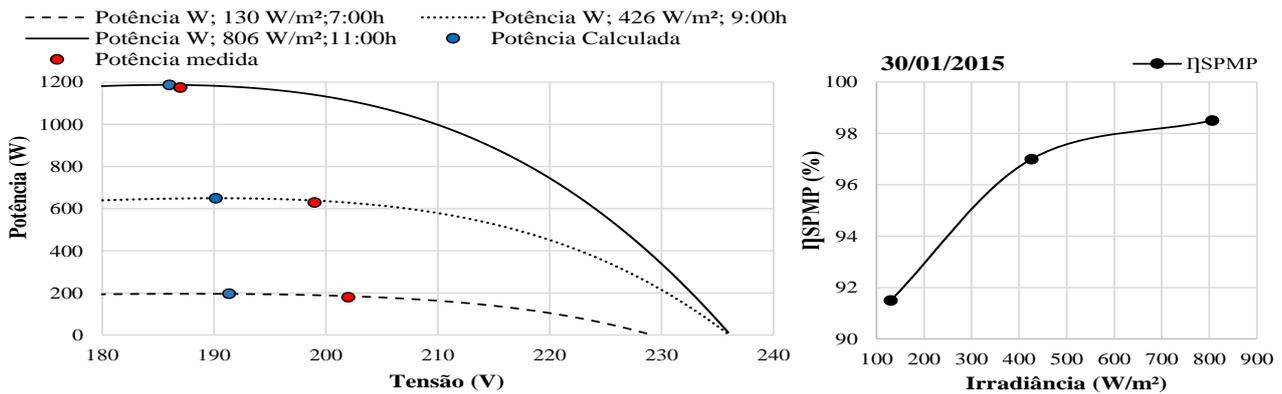


Figura 9 - Curva de potência do gerador FV e a Eficiência de Seguimento do Ponto de Máxima Potência para as medições no período da manhã do dia 30/01.

As curvas da Fig. 9 foram obtidas para os seguintes horários: 7:00h, 9:00h e 11:00h da manhã. Para três níveis de irradiância (baixo, médio e alto) a Eficiência do Ponto de Máxima Potência varia entre 91,8 e 98,3%. Para o mesmo dia, já no período da tarde, têm-se na Fig. 10 a η_{SPMP} que variou entre 88 e 99% para os diferentes níveis de irradiância.

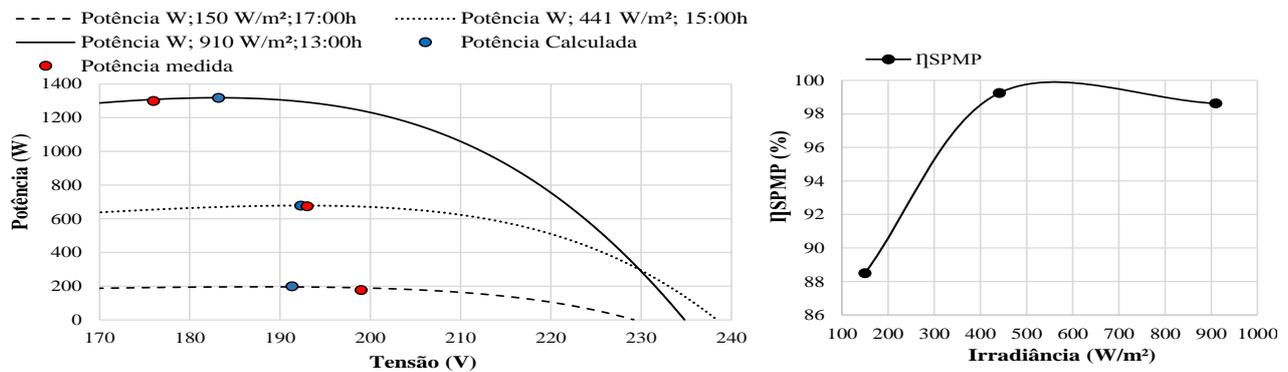


Figura 10 - Curvas de potência do gerador FV e a Eficiência de Seguimento do Ponto de Máxima Potência para as medições no período da tarde do dia 30/01.

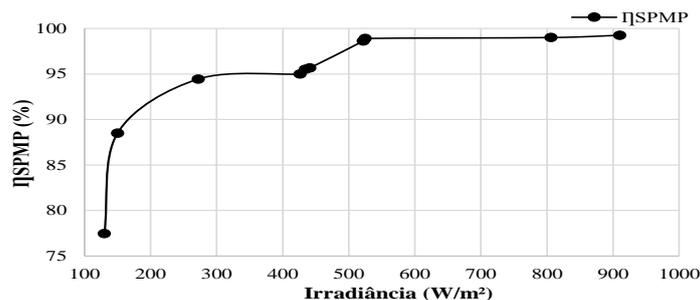


Figura 11 - Eficiência de Seguimento do Ponto de Máxima Potência para o dia 30/01.

A Fig. 11 mostra a curva completa da Eficiência do Ponto de Máxima Potência para o primeiro dia de operação do gerador FV, na qual se observa uma estabilidade na eficiência entre os níveis de irradiância de 500 a 1.000 W/m².

A Fig. 12(A) mostra o perfil da potência entregue a rede elétrica e o perfil de energia acumulada (7.578 kWh) para o dia 20/05. Pode-se observar que o gerador começou a injetar potência na rede a partir das 6:00h35min e termina por volta das 18:00hs. Porém, é observável que a partir das 16:00h ocorre uma diminuição acentuada da produção ocasionada pelo sombreamento que o prédio do GEDAE proporciona ao gerador FV, assim como ressaltado nas Figs. 5 e 6. Nota-se que nesse dia em particular a eficiência de conversão c.c.-c.a. do inversor cai para 91,5%.

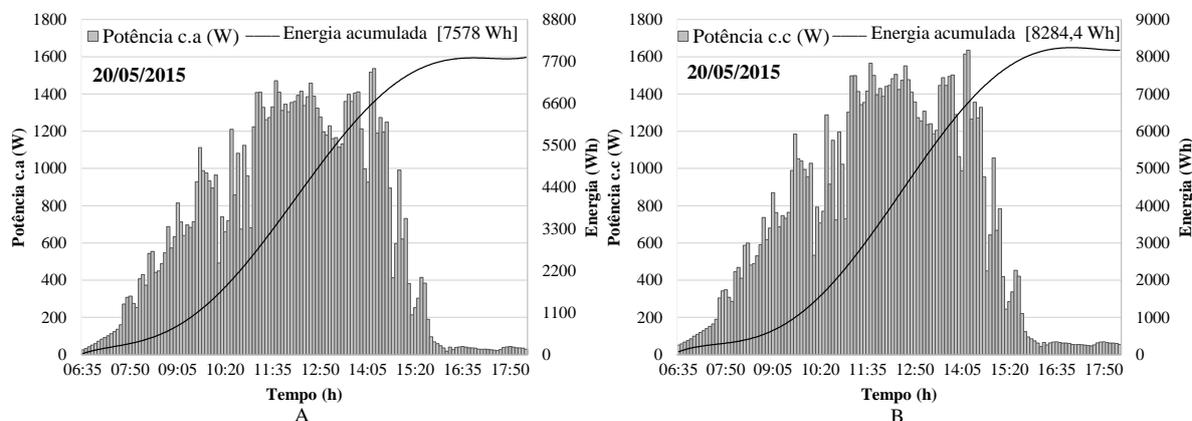


Figura 12 - Potência: (A) entregue a rede elétrica, (B) entregue ao inversor.

Esse sombreamento é melhor observado na Fig. 13 que mostra o perfil de irradiância desse período com um total de irradiação diária de 5.753 Wh/m².

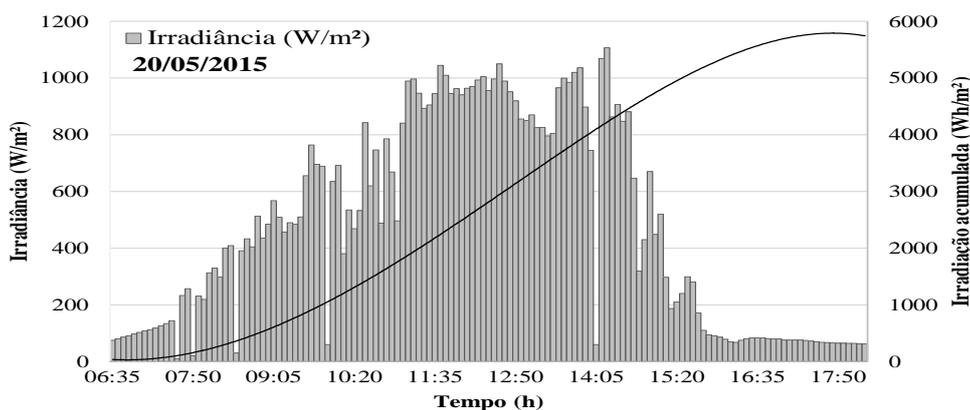


Figura 13 - Perfil de radiação do dia 25 de maio.

Utilizando-se dos dados da Fig. 12(B) e Fig. 13, e de posse da Eq. (1), pode-se calcular a (η_{FV}) para esse período.

$$\eta_{FV} = \frac{8.284,4}{5.753 \times 11,752} \times 100 = 12,20\%$$

Dois parâmetros importantes utilizados para avaliação do gerador FV são: A Produtividade de Referência (Y_R) e as perdas por Captura (L_C). Para a avaliação do sistema têm-se a Produtividade média mensal (Y_A) e o Rendimento Global (PR), todas essas equações foram analisadas por (Macêdo, 2006). A Produtividade média mensal pode ser calculada pela Eq. (3) dada em (kWh/kWp), onde P_{FV} é a potência nominal do gerador, dada em kWp.

$$Y_A = \left[\frac{E_{cc}}{P_{FV}} \right] \quad (3)$$

Para calcular a Produtividade de Referência em (horas/mês), que representa o recurso solar disponível para o sistema fotovoltaico durante todo o período, utiliza-se a Eq. (4).

$$Y_R = \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} Ht, \beta dt}{1000} \right] \quad (4)$$

As perdas por Captura (L_C) são perdas globais, ou seja, associadas a: perdas por sombreamento, perdas por associação entre os módulos fotovoltaicos, perdas por cabeamento, etc. Pode-se calcular L_C através da Eq. (5) dada em (% Y_R).

$$L_C = [Y_R - Y_A] \quad (5)$$

E por último o Rendimento Global do sistema que é dado pela relação entre Y_A e Y_F de acordo com Eq. (6) dada em percentagem.

$$PR = \left[\frac{Y_F}{Y_R} \right] \quad (6)$$

Onde Y_F é a Produtividade do Sistema em um determinado intervalo de tempo, definido pela relação entre a energia entregue à carga e a P_{FV} dada pela Eq. (7).

$$Y_F = \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{SAIDA} dt}{P_{FV}} \right] \quad (7)$$

De posse das equações descritas acima, pode-se estimar os parâmetros que representam o desempenho do sistema gerador FV mostrado na Fig. 15.

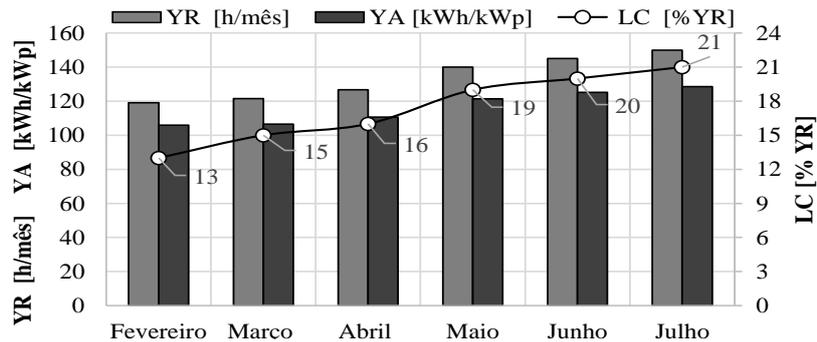


Figura 15 - Desempenho do gerador FV: Produtividade de Referência, Perdas por Captura.

Observa-se na Fig. 15 que a produtividade de referência mostra-se maior nos meses de julho, junho e maio, respectivamente, já as perdas por Captura são menores nos meses de fevereiro, março e abril. A produtividade média mensal observada na Fig. 15 apresenta a mesma tendência que a produtividade de referência. Mostra-se na Fig. 16 o Rendimento Global do sistema em que se apresenta maior no mês de fevereiro (89%), seguido dos meses de março e abril (87%), maio, junho e julho com cerca de 86%.

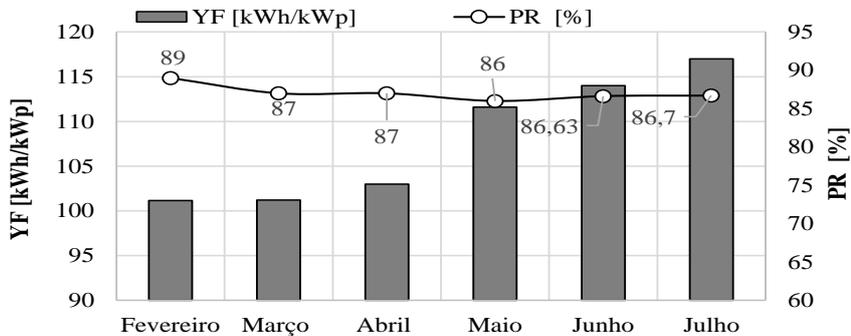


Figura 16 - Desempenho do sistema: Produtividade média mensal e Rendimento Global.

A produtividade do sistema (ver Fig. 16) apresentou maior no mês de julho seguido do mês de junho e a menor ocorreu no mês de fevereiro. Vale lembrar que a partir do dia primeiro de junho o gerador contou com um módulo a mais, passando de 1.680 kWp para 1.920 kWp. Ressalta-se que os dados obtidos através de simulações não descaracterizaram a análise real do sistema pois estudos anteriores realizados por (Júnior, 2014) com módulos com mesma tecnologia mostraram-se bastante próximo, validando assim a metodologia proposta aqui.

3. CONCLUSÃO

Este estudo mostra a monitoração de um SFCR, tendo como foco principal a análise dos resultados a partir dos parâmetros elétricos do mesmo. Apesar da análise do desempenho do Gerador FV não ser para o período um período maior, foram priorizadas as análises pontuais dos dados obtidos juntamente com as simulações computacionais, as quais apresentaram resultados aceitáveis, em termos de produtividade, eficiência global, perdas por captura e geração de energia elétrica, tendo em vista os níveis de sombreamentos apresentados. Estes sombreamentos foram causados por uma árvore e pela edificação do laboratório, ambos situados no entorno do gerador FV. As perdas por captura ficaram entre 13% a 21%.

Os dados obtidos através de simulações foram utilizados para dar subsídios a algumas análises, haja vista que o sistema de aquisição não conta com todas as medições necessárias para avaliação realizada nesse estudo, por isso se justifica a simulação do gerador fotovoltaico. Com o auxílio dessas simulações foi possível calcular a eficiência de SPMP, onde os valores obtidos superam os 95% para níveis de irradiância acima de 300 W/m², chegando a aproximadamente 99% para valores de irradiância acima de 500 W W/m².

Por último destaca-se o possível impacto do sombreamento na eficiência média de conversão c.c.-c.a. do inversor, devido a redução do carregamento. Fato este evidenciado pelas informações obtidas durante os dias 30/01/2015 e 20/05/2015, caracterizados por dias sem e com sombreamento, onde os valores indicam eficiências de 95% para os primeiros meses de operação (janeiro e fevereiro) e 91,5% para os meses maio e junho. Além disso, esse possível impacto afeta o Rendimento Global do sistema que se apresenta maior no mês de fevereiro com 89% e menor nos meses de maio, junho e julho.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do edital Chamada **Universal – MCTI/CNPq N° 14/2013** e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA), além do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA).

REFERÊNCIAS

- Júnior, N, Wilson, 2014. Monitoramento do Desempenho de Diferentes Tecnologias de Módulos Fotovoltaicos, Dissertação de Mestrado, PPGEE, UFPA, Belém do Pará.
- Macêdo, N, Wilson, 2006. Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Tese de Doutorado, PIPGE, USP, São Paulo.
- Zilles, R., 2012. Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede Elétrica.

EXPERIMENTAL RESULTS OF 8 MONTHS OPERATION GCPVS

Abstract. *This work shows some results of 8 months of operation of a grid-connected photovoltaic system (GCPVS). The PV generator of monocrystalline technology is installed at the test area of the Renewable Energy and Energy Efficiency Laboratory of the Group of Studies and Development of Alternatives Energy (GEDAE) of the Federal University of Pará (UFPA). During four months, this system operated with seven PV modules of 240 Wp and four other for month with eight modules of 240 Wp. First is analyzed energy production for the whole period and the energy produced day-to-day with 1.680 kWp and the 1.920 kWp PV generator. Second is carried out a study of maximum power point tracking efficiency for various levels of radiation. Finally, it is shown the average monthly productivity, reference productivity, capture losses and the overall performance of the system.*

Keywords: *Solar energy, Grid-connected photovoltaic system.*