

ANÁLISE DA PRODUTIVIDADE DO PRIMEIRO ANO DE OPERAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM SEGUIDOR SOLAR DE EIXO HORIZONTAL

Maurício Andrés Rodríguez Cassares – mauricio.cas@usp.br

Marcelo Pinho Almeida – marcelopa@iee.usp.br

Roberto Zilles – zilles@iee.usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente.

Resumo. A partir de 2014, o interesse pelas grandes centrais de geração fotovoltaica tem aumentado no Brasil. Visando elevar a produtividade dos sistemas e, com isso, alavancar a competitividade econômica, muitos dos investidores de grandes projetos estão optando pela utilização de sistemas com seguidor solar. Contudo, há pouco conhecimento sobre o real desempenho operacional de sistemas fotovoltaicos com seguidores no país. Este trabalho avalia um sistema fotovoltaico com seguidor de eixo horizontal instalado na Universidade de São Paulo, no campus da cidade de São Paulo, bem como a comparação deste sistema com um sistema fotovoltaico fixo. Para realizar as avaliações nos estudos de caso, foram utilizadas as figuras de mérito produtividade final, Y_F , e rendimento global, PR. Os resultados mostram que o ganho médio de produtividade final que teve o sistema fotovoltaico com seguidor de eixo horizontal ao longo de seu primeiro ano de operação foi de 17,4% quando comparado com o sistema fixo.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Seguidor solar, Produtividade.

1. INTRODUÇÃO

Seguidores solares são dispositivos eletromecânicos que movimentam e orientam uma superfície na direção do Sol, de forma que o uso destes mecanismos em sistemas fotovoltaicos tem o objetivo de aumentar a produção de energia elétrica, pois o resultado do seguimento do Sol se traduz em maior captação de energia pela superfície móvel em relação à que seria obtida em uma superfície fixa, horizontal ou inclinada, situada no mesmo local.

De maneira geral, há dois tipos de seguidores: os de um e os de dois eixos. Os primeiros somente acompanham o movimento do Sol durante o dia, na direção leste-oeste. Já os seguidores de dois eixos, além de acompanharem o movimento diário do Sol, elevação e/ou azimute, também acompanham o movimento sazonal ao longo do ano, podendo proporcionar incidência da radiação solar perpendicular ao plano dos módulos fotovoltaicos.

Gomés-Gil *et al.* (2012) analisaram várias usinas fotovoltaicas na Espanha, e constataram que, em comparação com sistemas fixos, sistemas com seguidores de um e dois eixos têm 22,3% e 25,2% de ganho anual, respectivamente. Esses ganhos reais são menores que os 32,1% para 1-eixo e 38,7% para 2-eixos previstos considerando apenas a diferença de radiação capturada por essas configurações.

Vermaak (2014) analisou quatro diferentes configurações de seguidores solares na África do Sul utilizando sistemas fotovoltaicos de 1 kWp e de 1 MWp, e constatou que, em comparação com sistemas fixos, sistemas com seguidores de um e dois eixos têm 33% e 37% de ganho anual, respectivamente.

A partir de 2014, o interesse pelas grandes centrais de geração fotovoltaica tem aumentado no Brasil. Até meados de 2016 foram realizados três Leilões de Energia de Reserva, resultando na contratação da energia proveniente de empreendimentos fotovoltaicos que somam aproximadamente 3,2 GWp. Estes leilões foram realizados em outubro de 2014 e em agosto e novembro de 2015 (EPE, 2014), (EPE, 2015a), (EPE, 2015b). Visando aumentar a produção dos sistemas e, com isso, incrementar a competitividade econômica, muitos investidores dos leilões optaram pela utilização de sistemas com seguidores solares. Dos 94 empreendimentos fotovoltaicos já contratados, 65% apresentam projetos utilizando seguidores solares de um eixo com fatores de capacidade que variam entre 23,3% e 31,5%, enquanto que os empreendimentos que utilizam estrutura de suporte fixa apresentam valores de fator de capacidade entre 18% e 25% (EPE, 2014), (EPE, 2015a), (EPE, 2015b).

Roncolatto *et al.* (2014) publicaram um estudo da Usina Fotovoltaica de Tanquinho, no Brasil, na qual são utilizados sistemas com seguidor de eixo horizontal. Eles constataram que, em comparação com sistemas fixos, os sistemas com seguidor de um eixo têm cerca de 11% de ganho anual.

Este panorama de uso de seguidores solares em empreendimentos fotovoltaicos visando o incremento da produtividade e atratividade econômica exige atenção. Ainda há pouco conhecimento no país sobre o desempenho operacional de sistemas fotovoltaicos com seguidores. Esta situação reforça a necessidade de realizar estudos e avaliações operacionais desse tipo de sistema.

Desse modo, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise comparativa da produtividade entre um protótipo de sistema com seguidor solar de um eixo e um sistema fotovoltaico fixo, ambos instalados no Instituto de Energia e

Ambiente da Universidade de São Paulo – IEE/USP. Os dados utilizados englobam o primeiro ano de operação do protótipo, desde maio de 2016 até abril de 2017. Os resultados obtidos compõem um conjunto de informações para subsidiar a utilização de rastreadores de um eixo no Brasil e, em particular, no Oeste do Estado de São Paulo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No IEE/USP foi projetado e construído um protótipo de seguidor solar de eixo horizontal para um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de 2,5 kWp. Com este desenvolvimento, o qual esteve inserido no contexto do projeto P&D: “Seguidores solares para sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Sistemas com e sem concentração”, procura-se ter um seguidor solar com peças e controle nacional, o qual a indústria brasileira consiga reproduzir e deste modo amenizar a falta desse tipo de produto no mercado nacional e criar uma opção para as tradicionais estruturas fixas de suporte dos módulos fotovoltaicos (RODRIGUEZ *et al.*, 2014).

Para determinar o aumento da produtividade do sistema com seguidor em relação a um sistema fixo, o desempenho do seguidor é comparado com o sistema fotovoltaico instalado no estacionamento do IEE/USP. A Fig. 1 mostra a localização destes dois sistemas.



Figura 1 - Localização do protótipo do seguidor, círculo vermelho, e do sistema fotovoltaico fixo, retângulo vermelho, no IEE/USP. Coordenadas: 23,5°S 46,7°O.

2.1 O protótipo do seguidor solar

O protótipo do seguidor solar de eixo horizontal, apresentado na Fig. 2, possui uma liberdade de movimento de seu plano de rastreamento de 120° em torno de seu eixo, sendo 60° para o leste e 60° para o oeste, e seu sistema de controle oferece a possibilidade de escolher entre os modos de rastreamento eletro-óptico e microprocessado (RODRIGUEZ *et al.*, 2014).



Figura 2 - Protótipo do seguidor solar de um eixo horizontal.

No protótipo está instalado um sistema fotovoltaico conectado à rede de 2,5 kWp, cujo gerador é composto por 10 módulos de silício monocristalino de 250 Wp cada, e um inversor de 3 kW. Um diagrama unifilar do sistema é apresentado na Fig. 3.

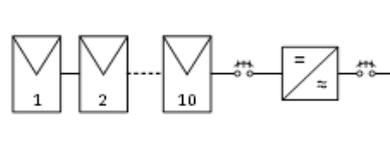


Figura 3 - Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico instalado no protótipo do seguidor.

Para realizar a medição da irradiância incidente no plano do sistema fotovoltaico, foi utilizado um módulo de referência instalado ao lado do gerador, como mostra a Fig. 2. O sinal do sensor é registrado e armazenado a cada 30 segundos por um *Datalogger Agilent* modelo 34970A.

2.2 Sistema fotovoltaico fixo

O IEE/USP conta com um sistema fotovoltaico integrado na cobertura de uma de suas áreas de estacionamento. Esse sistema é constituído por um gerador fotovoltaico de 150 kWp distribuído em 24 subsistemas de 6,24 kWp e um inversor de 5 kW nominais. Cada um desses subsistemas é composto por uma série fotovoltaica de 24 módulos de 260 Wp.

A cobertura do estacionamento dá um aspecto de superfície curvada. Este efeito é obtido utilizando-se três diferentes inclinações para os módulos fotovoltaicos, 30°, 20° e 10°, como pode ser observado na Fig. 4. Cabe aclarar que cada série fotovoltaica está instalada em uma única inclinação, tal como se observa no diagrama unifilar do sistema apresentado na Fig. 5.



Figura 4 - Sistema fotovoltaico fixo instalado no estacionamento do IEE/USP.

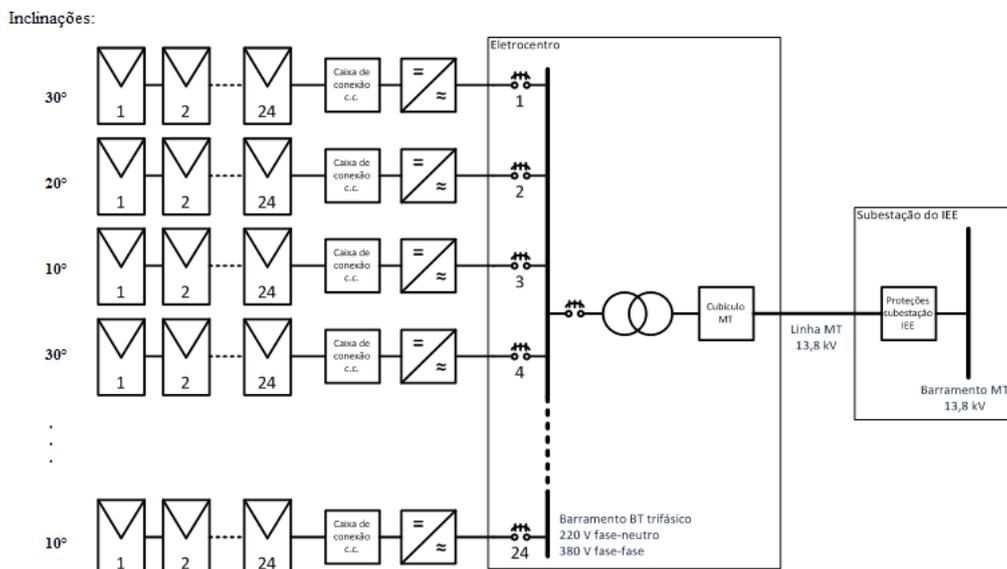


Figura 5 – Diagrama unifilar do sistema fotovoltaico fixo.

O sistema fotovoltaico fixo que é utilizado para realizar a comparação de produtividade com a do seguidor é um dos subsistemas que se encontra com inclinação de 20°. Este subsistema foi escolhido porque sua inclinação é a que mais se aproxima da latitude do local onde se encontra o seguidor: 23,5°S.

O sistema fixo conta com um sistema supervisório SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), com o qual se monitora e registra as principais variáveis ambientais e elétricas como irradiância, potência, e temperatura do gerador fotovoltaico.

3. FIGURAS DE MÉRITO

As figuras de mérito utilizadas foram a Produtividade Final (Y_F) e o Desempenho Global (PR) (Almeida e Zilles, 2012).

3.1 Produtividade Final

A Produtividade Final, Y_F , expressa em kWh/kWp, e é a razão entre a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico em um determinado intervalo de tempo e a potência nominal do gerador, como mostra a Eq. 1.

$$Y_F = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{Saída} \times dt}{P_{FV}^0} = \frac{E_{c.a.}}{P_{FV}^0} \quad (1)$$

onde $P_{Saída}$ é a potência instantânea gerada, P_{FV}^0 é a potência nominal do gerador fotovoltaico e $E_{c.a.}$ é a energia gerada, entregue à rede elétrica, no período de tempo $t_2 - t_1$.

O parâmetro Y_F normaliza a energia produzida pelo porte do sistema, e, consequentemente, é uma maneira bastante conveniente de comparar sistemas fotovoltaicos de diferentes potências nominais instalados próximos.

3.2 Rendimento Global

O Rendimento Global, PR , é definido pela Eq. 2. O PR é adimensional e indica o rendimento do sistema em relação a um sistema teórico ideal e sem perdas. A partir dessa normalização com respeito à disponibilidade do recurso solar, são quantificadas as perdas devido a diversos fatores, como: eficiência do inversor, perdas elétricas, temperatura do módulo, perdas por reflexão, sujeira, sombreamento e falhas dos componentes.

$$PR = \frac{E_{c.a.} G_{ref}}{P_{FV}^0 H_{plano}} \quad (2)$$

onde G_{ref} é a irradiância nas condições padrão de ensaio (1000 W/m²) e H_{plano} é a irradiação no plano do gerador fotovoltaico. No cálculo do PR, para o sistema fixo considera-se a irradiação no plano inclinado de 20°. Já para o sistema do seguidor, considera-se a irradiação no plano do seguidor.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os valores utilizados neste estudo são geração (energia injetada na rede) de cada um dos sistemas e irradiação, todos com resolução temporal diária. O período de análise é composto por 365 dias, desde maio de 2016 até abril de 2017.

A Fig. 6 apresenta a potência em corrente alternada (c.a.) injetada na rede elétrica durante três dias ensolarados do período da análise, que são: 13 de junho (dia próximo do solstício de inverno), 23 de setembro (equinócio de primavera) e 26 de dezembro (dia próximo do solstício de verão). Pode-se observar que o sistema conseguiu manter os valores de potência aproximadamente constantes ao longo de cada dia. Os afundamentos de potência que se podem notar na Fig. 6 foram causados pelo sombreamento de nuvens.

Destaca-se o comportamento do sistema ao longo dos meses: partindo do dia 13, a energia c.a., que graficamente é a área sob as curvas, aumenta ao se aproximar ao solstício de verão. Isso acontece porque no solstício de inverno o seguidor encontra-se na pior situação, já que, para essa data, a altura solar máxima (altura no meio dia) é a menor do ano, que, no caso de São Paulo, é de aproximadamente 43°, e dado que seu eixo é horizontal os raios solares atingem o plano do gerador no ângulo de 43°. Nesse dia a potência atingida está ao redor de 1600 W. Porém, na medida em que os dias transcorrem e a altura solar máxima vai aumentando, o seguidor vai incrementando seu desempenho. Assim, para o dia 26 de dezembro, a altura solar máxima é aproximadamente 90°, estando agora o seguidor na melhor situação, já que os raios solares o atingem perpendicularmente. Nessas condições o sistema atingiu potência ao redor de 2100 W.

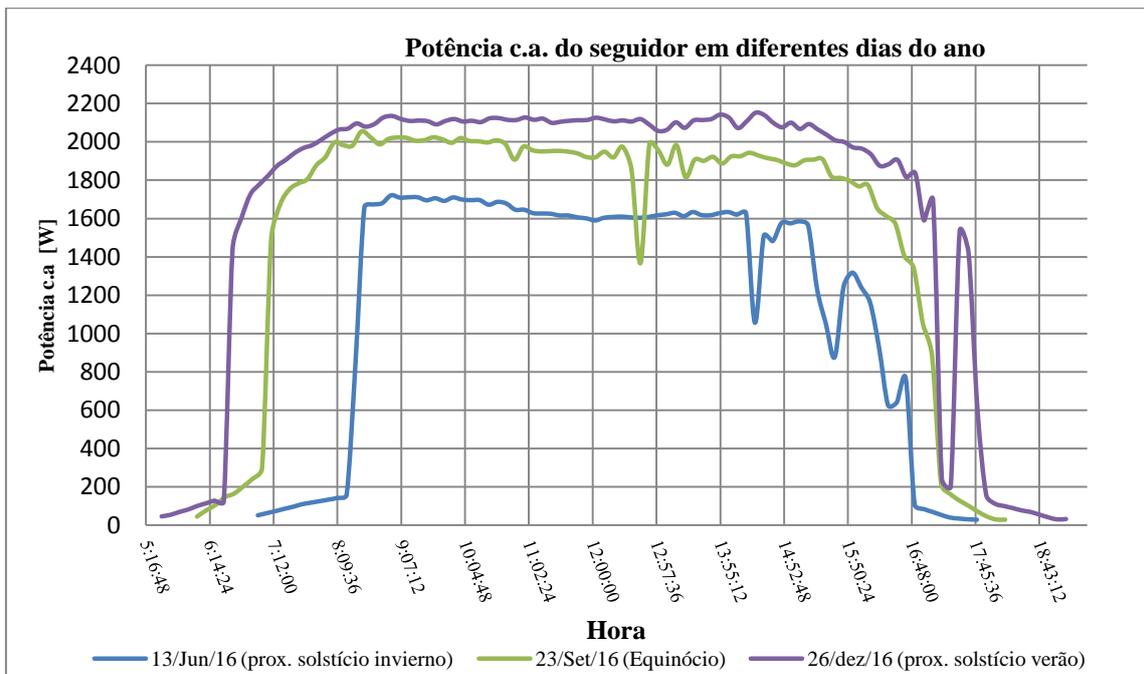


Figura 6 - Potência c.a. do sistema com seguidor em diferentes dias.

Para comparar de forma adequada em um mesmo gráfico o perfil de geração do seguidor com o do sistema fixo, foi necessário normalizar os valores de potência com respeito às potências nominais de seus respectivos geradores, já que os sistemas têm potências diferentes e, por conseguinte, geram quantidades diferentes de energia c.a. Para essa comparação, utilizou-se o dia 27 de agosto, apresentado na Fig. 7.

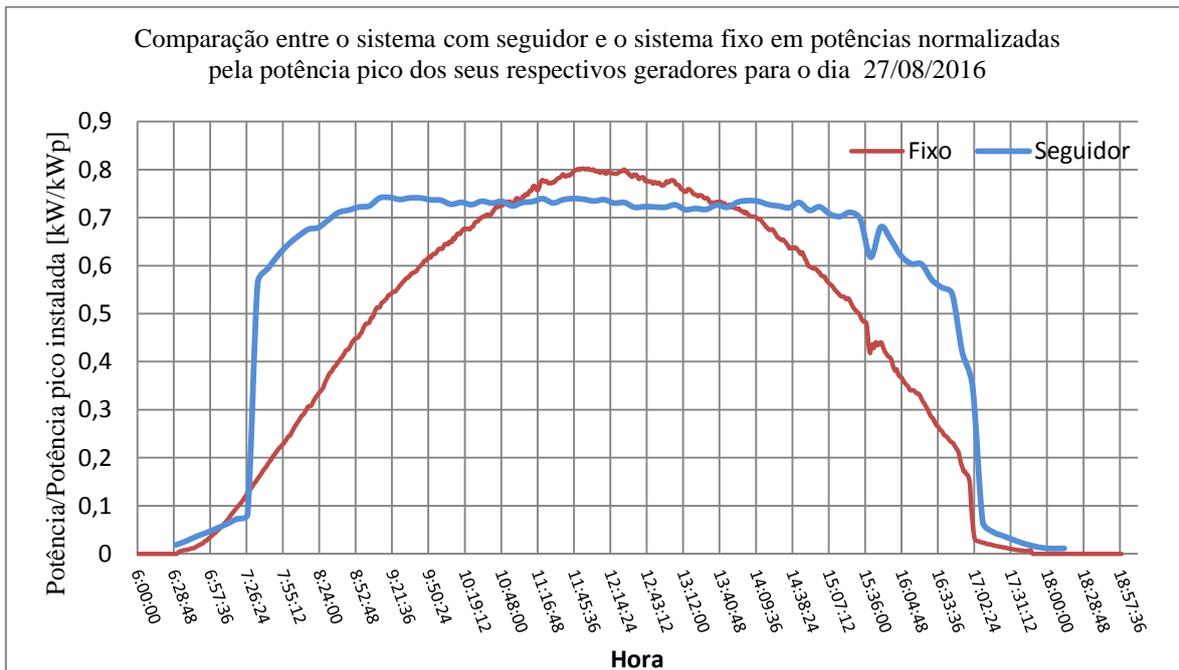


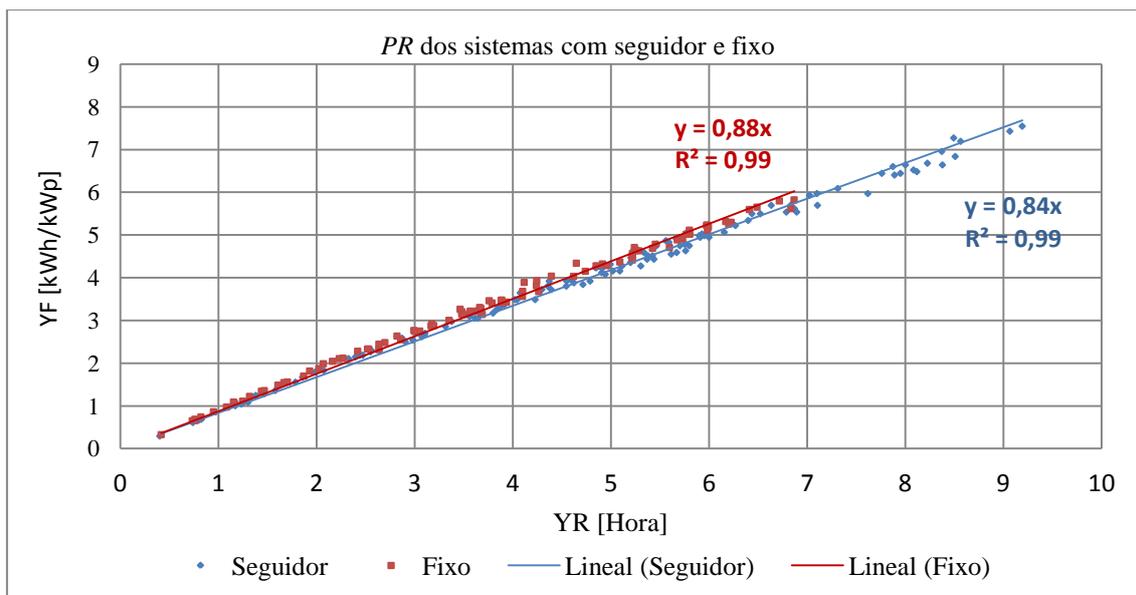
Figura 7 - Comparação entre o sistema do seguidor e o sistema fixo em potências normalizadas pela potência pico dos seus respectivos geradores para o dia 27/08/2016.

Um aspecto importante no gráfico da Fig. 7 é que as áreas sob as curvas representam a produtividade de cada sistema. Assim, graficamente percebe-se que o sistema com seguidor gera mais energia por cada kWp instalado do que o sistema fixo, ou seja, o sistema do seguidor teve uma produtividade maior. Essa maior produtividade é claramente explicada pela maior geração do sistema com seguidor nas horas da manhã e nas horas da tarde. Concretamente, o sistema com seguidor apresentou uma produtividade 18,5% maior. A Tab. 1 apresenta os valores obtidos da energia injetada na rede ($E_{c.a.}$) e de Y_F para ambos os sistemas, assim como o ganho obtido pelo uso do seguidor comparado com o sistema fixo nesse dia de céu limpo.

Tabela 1 – Comparação entre o desempenho energético dos sistemas com seguidor e fixo para o dia 27/08/2016.

Parâmetros	Seguidor	Fixo	Ganho no uso do seguidor
$E_{c.a.}$ [kWh/dia]	16,3	34,3	-
Y_F [kWh/kWp]	6,5	5,5	18,5%

Em relação ao PR anual, a Fig. 8 apresenta a produtividade diária comparada com o recurso solar diário dos dois sistemas, de forma que as declividades das duas regressões lineares com que são aproximados esses valores representam os PR médios ao longo do período de análise (ver Eq. 3).

Figura 8 - PR dos sistemas com seguidor e fixo.

O PR anual do seguidor foi de 84%, enquanto que o PR anual do sistema fixo foi de 88%. A diferença nos PR está principalmente no fato de que os sistemas comparados não são iguais: eles têm fatores de dimensionamento diferentes, o que faz que os pontos de operação dos seus inversores fiquem em lugares diferentes das curvas de eficiência; os inversores são de fabricantes diferentes, por conseguinte possuem curvas de eficiência de conversão e algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência diferentes; e os módulos fotovoltaicos também são de fabricantes diferentes. Todas essas diferenças fazem com que as taxas de perdas sejam diferentes, e é isso o que está refletindo os PR . Contudo, a diferença entre os dois PR é pequena, e ambos os valores estão dentro da faixa do que é considerado normal.

Por último, a Fig. 9 apresenta a variação de produtividade do sistema com seguidor em comparação ao sistema fixo obtida no período de análise. Pode-se ver que, devido à altura solar, nos meses próximos ao inverno a variação é negativa, -5% em maio e -6% em junho. Porém, a variação começa a aumentar na medida em que vão passando os meses, até chegar ao pico de 30% em fevereiro. A partir de fevereiro, observa-se como a variação de produtividade começa a diminuir, até chegar a 8% em março. Espera-se que, ao chegar em maio, a tendência se repita.

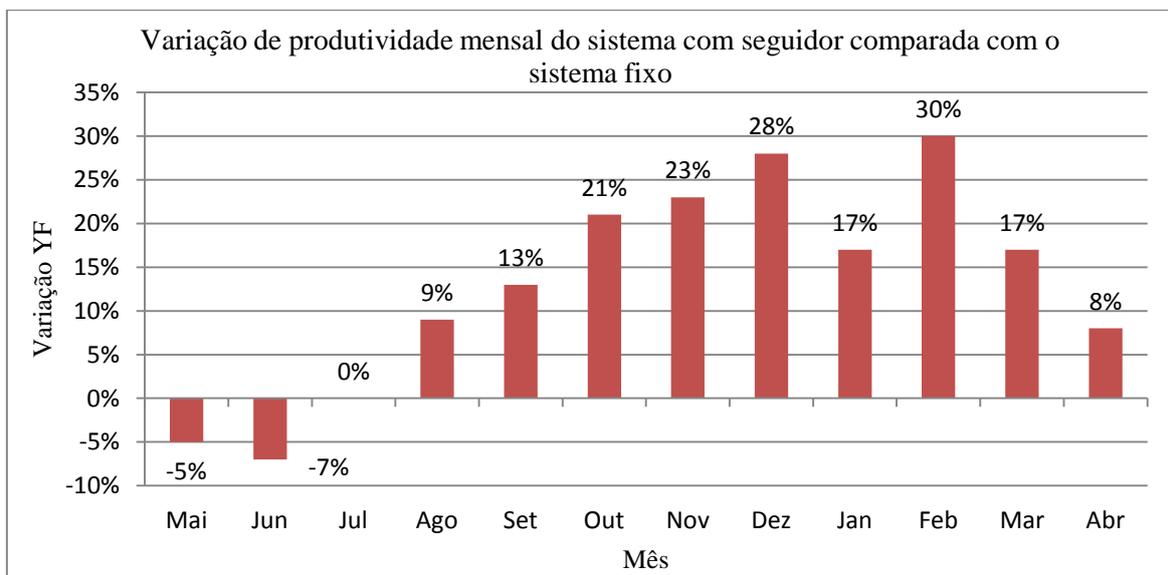


Figura 9 - Variação de produtividade mensal do sistema com seguidor comparada com a do sistema fixo.

A queda que se observa no mês de janeiro deve-se ao fato de que esse mês foi particularmente chuvoso, com alto número de dias nublados, condição que aproxima a produtividade dos dois sistemas.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliado o desempenho do protótipo de seguidor de eixo horizontal, desenvolvido e instalado no IEE/USP, ao longo de seu primeiro ano de operação, de maio de 2016 até abril de 2017, bem como a comparação deste sistema com um sistema fotovoltaico fixo. Para realizar estas avaliações foram utilizadas as figuras de mérito produtividade final (Y_F), rendimento global (PR).

De maneira geral, o protótipo apresentou um comportamento conforme o esperado, e, como foi construído com peças disponíveis no mercado nacional, mostra um grande potencial para ser reproduzido pela indústria sem a necessidade de importar estruturas, caixas redutoras e software de controle. Esta opção dependerá da competitividade de preços dos componentes nacionais.

Os resultados de desempenho do sistema fotovoltaico instalado no protótipo de seguidor de eixo horizontal foram comparados com os de um sistema fixo inclinado em 20° , também instalado no IEE/USP. Em relação ao valor médio do PR , o sistema fotovoltaico com seguidor de eixo horizontal apresentou um valor de 84%, enquanto que o sistema fixo apresentou um valor de 88%. A diferença dos PR pode ser explicada pelo fato de que os dois sistemas não são exatamente iguais: eles têm diferentes fatores de dimensionamento, diferentes fabricantes dos inversores e dos módulos fotovoltaicos, entre outros fatores. Todas essas pequenas diferenças fazem com que as taxas de perdas sejam distintas, o que é refletido no PR .

Observou-se que, nos meses de maio e junho, os valores de Y_F do sistema com seguidor de eixo horizontal foi 5% e 7% inferior à do sistema fixo, respectivamente. A partir de julho, os valores de Y_F do sistema com seguidor de eixo horizontal superaram os do sistema fixo, chegando a ser 30% maior em fevereiro. No período analisado, o ganho médio de Y_F do sistema com seguidor de eixo horizontal foi de 17,4%. Merece aqui mencionar que este ganho é afetado pela latitude do local, já que não é possível acompanhar as variações da altura solar ao longo do ano. Portanto, seguidores de eixo horizontal oferecem ganhos maiores em latitudes próximas do equador.

REFERÊNCIAS

- Almeida, M. P., Zilles, R., 2012. Cálculo de Parâmetros de Desempenho para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES. São Paulo, Brasil.
- EPE, 2014. Leilão de Energia de Reserva de 2014. Participação dos Empreendimentos Solares Fotovoltaicos: Visão Geral. EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro.
- EPE, 2015a. Expansão da geração: 1º leilão de energia de reserva de 2015. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro.
- EPE, 2015b. Expansão da geração: 2º Leilão de energia de reserva de 2015. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro.
- Gómez-Gil, F. J.; Wang, X.; Barnett, A. 2012. Energy production of photovoltaic systems: Fixed, tracking, and concentrating. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, p. 306–313..

- Rodriguez, M. A., Almeida, M. P., Pinto, A. F., Zilles, R., Silva, J. F. R., 2014. Protótipo de Seguidor solar de eixo horizontal para sistemas fotovoltaicos. V Congresso Brasileiro de Energia Solar. Recife, Brasil
- Roncalatto, R. A., Donadon, A. R., Camargo, J. C., 2014. Avaliação técnica e econômica de sistema móvel versus fixo na usfv tanquinho. VI CBENS - VI Congresso Brasileiro de Energia Solar. Belo Horizonte, Brasil.
- Vermaak, H. J., 2014. Techno-economic analysis of solar tracking systems in South Africa. Energy Procedia, v. 61, p. 2435 – 2438.

YIELD ANALYSIS OF THE FIRST YEAR OF OPERATION OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM WITH HORIZONTAL SINGLE AXIS SOLAR TRACKER

Abstract. *Since 2014, interest in large-scale photovoltaic power plants has increased in Brazil. Aiming to raise system yield and thereby boosting economic competitiveness, many investors are making use of solar tracking systems. However, there is little knowledge on the actual operational performance of photovoltaic systems with solar tracking in the country. This paper evaluates a photovoltaic system with horizontal axis tracking installed at the University of São Paulo-USP, on the campus of the city of São Paulo, as well as the comparison of this system with a fixed photovoltaic system. In order to carry out these assessments, the final yield, Y_F , and the performance ratio, PR , were used as performance parameters. The results show the average final yield gain of the photovoltaic system with horizontal axis tracker during its first year of operation was 17,4% when compared to the fixed system.*

Key words: *Solar photovoltaic, Solar tracking, final yield.*