

# AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SEGUIDOR SOLAR MONOAXIAL PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ISOLADOS

**Danielle Alves Barbosa** – daniellealves@ifce.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento de Indústria

**Paulo Cesar Marques de Carvalho** – carvalho@dee.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica.

**Geraldo Luis Bezerra Ramalho** – glbramalho@gmail.com

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento de Indústria

**André Pimentel Moreira** – apmoreira@ifce.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Departamento de Indústria

**Manuel Rangel Borges Neto** – manuel.rangel@ifsertao-pe.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sertão Pernambucano, Departamento de Ensino Básico

**Raimundo José Andrade de Menezes** – raimundo.menezes@uefs.br

Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Industrial

**Resumo.** A região Nordeste do Brasil apresenta condições favoráveis ao aproveitamento da energia solar fotovoltaica tanto por sua localização próxima à linha do Equador, quanto pelas pequenas variações de irradiação solar média ao longo do ano. Este artigo traz o resultado de um experimento que permitiu o estudo comparativo da produção de energia elétrica entre dois sistemas fotovoltaicos ambos voltados para o Norte verdadeiro, inclinados em 15 graus em relação ao plano horizontal, sendo um estacionário e o outro móvel, associado a um seguidor solar monoaxial. As medições foram realizadas com intervalos de posicionamentos angulares do seguidor solar de 15, 30 e 60 minutos, em configurações de malha aberta e de malha fechada. A partir de uma média de irradiância, foi selecionado um dia típico para cada sistema e consequente intervalo de atualização da posição angular. Foi observado um aumento de 27,42% no desempenho da geração de energia elétrica para o sistema de seguidor solar com intervalo de atualização da posição angular de 60 minutos em malha fechada.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica, Seguidor Solar, Geração de Energia.

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a utilização de sistemas fotovoltaicos está em estágio inicial de desenvolvimento. Contudo, o índice de radiação solar global disponível no Brasil é um dos mais altos do mundo, o que é fundamental para a geração da energia fotovoltaica. Esse fato, aliado ao aumento do preço da energia convencional e aos incentivos governamentais tende a impulsionar a utilização desse tipo de geração no país.

Como exemplo de um incentivo governamental pode-se citar a resolução 687 da ANEEL, publicada em novembro de 2015, que fornece as condições gerais para o acesso da micro-geração (até 75 kW) e da mini-geração (de 75 kW a 5 MW) à rede de distribuição. A 687 considera as fontes hidro, solar, eólica, biomassa ou cogeração como fontes de eletricidade para alimentar a rede. A energia elétrica produzida pode ser utilizada para atender o consumo local e o excedente injetado na rede, gerando créditos de energia.

Segundo Brasil Solar (2013), a região nordeste do Brasil, por estar ainda mais próxima da linha do Equador é a que possui maiores índices de irradiação solar diária, variando em um dia entre 5,7 e 6,1 kWh/m<sup>2</sup>. Esses potenciais colocam a região nordeste como uma região viável para a implantação de quaisquer instalações solares, para suas aplicações. Segundo Viana (2011), a viabilidade da implantação de sistemas fotovoltaicos ocorre quando o nível de irradiação solar direta apresentam valores a partir de 1400 kWh/m<sup>2</sup>/ano.

Nesse contexto os dispositivos mecânicos denominados de seguidores solares e também conhecidos como rastreadores solares, têm como objetivo manter os sistemas FV (Fotovoltaicos) sempre voltados para o Sol, em posição perpendicular aos raios solares. Deste modo, o rendimento do sistema aumenta devido à maior incidência da componente de energia direta.

## 2. SEGUIDORES SOLARES

Diversos tipos de seguidores solares são aplicados conforme o local de instalação do sistema FV. Os custos variam de acordo com a complexidade, funções e estratégias do acompanhamento do Sol. De acordo com Pinto *et al* (2010), os seguidores são classificados quanto ao número de eixos rotativos, a estratégia de rastreamento, o tipo de estrutura utilizada e o tipo de controle.

Os sistemas que utilizam seguidores solares monoaxial podem ser posicionados horizontalmente, verticalmente ou inclinados e sua orientação pode ser no sentido norte-sul ou leste-oeste. Devido ao rastreamento do movimento do Sol

ser realizado em apenas um sentido, esses sistemas apresentam um menor custo, são mais simples quanto à mecânica e ao controle, porém, tem uma menor eficiência. A eficiência desse tipo de configuração de eixo é maior em regiões equatoriais, onde a incidência de Sol não varia significativamente com o movimento da Terra. Na Fig. 1 são observadas as configurações do posicionamento horizontal (a), vertical (b) e inclinado (c), respectivamente.

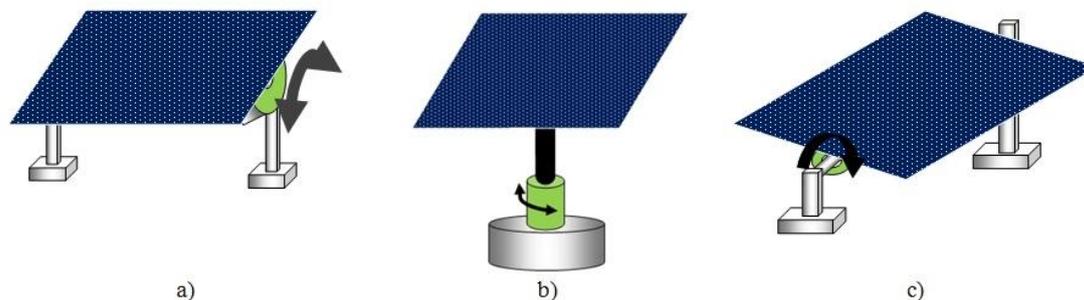


Figura 1- Configurações de seguidores solares com um eixo.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Seguidor solar

O seguidor solar do Laboratório de Energias Alternativas da Universidade Federal do Ceará (LEA-UFC) possui uma armação fixa e uma plataforma móvel, onde é fixado o painel FV. A plataforma, juntamente com o painel FV, possui inclinação de  $15^\circ$  em relação ao solo (Fig. 2a e Fig. 2b). A inclinação foi estabelecida a fim de evitar o acúmulo de poeira e água das chuvas, fatores que reduzem a eficiência na geração de eletricidade. O movimento de rotação da plataforma juntamente com o painel FV móvel é realizado por um sistema de transmissão composto por correia, polias e engrenagens acionados pelo motor de passo (Fig. 2c). Os movimentos de rotação são limitados pelos fins de cursos FC1 e FC2 (Fig. 2d).

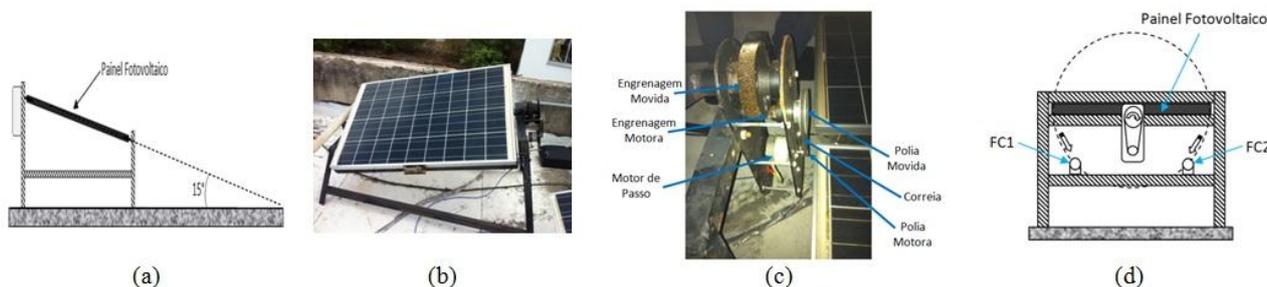


Figura 2- mecanismo de transmissão e acionamento da plataforma de giro do seguidor solar.

Além do seguidor solar, foram utilizados nos experimentos de aquisição de dados para a avaliação do desempenho dos sistemas, o painel KC85T (Fig. 3a), o Piranômetro LP02 (Fig. 3b), CLP Twido (Fig. 3c) e as lâmpadas halógenas de 55W (Fig. 3d) cujo objetivo é simular cargas para a medição de consumo.



Figura 3- Equipamentos do LEA –UFC utilizados.

#### 3.2 Desempenho do seguidor solar

Foram coletados dados de irradiância, corrente e tensão aplicadas nas cargas para realizar o estudo comparativo da geração de eletricidade entre um painel fotovoltaico fixo e outro com seguimento solar monoaxial. Foram adotados

intervalos de posicionamentos angulares de 15, 30 e 60 minutos com funcionamento em malha aberta e malha fechada. A partir de uma estimativa média de irradiância, foi selecionado um dia típico para cada sistema, assim como o intervalo de atualização da posição angular.

Em ambas as configurações (malha aberta e malha fechada), o acionamento do motor de passo se dá de acordo com os parâmetros de funcionamento do seguidor solar observados na Tab. 1 no período de 12h e deslocamento angular total de 100 graus. Foram analisados dados dos meses de Abril, Maio e Junho de 2015.

Para realizar o controle, monitoramento e aquisição de dados dos painéis FV, os equipamentos foram conectados com as configurações em malha aberta e fechada. Na Fig. 4 são observadas as configurações de controle de posicionamento angular em malha aberta e malha fechada. Os dados do experimento foram coletados e armazenados por meio de um sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

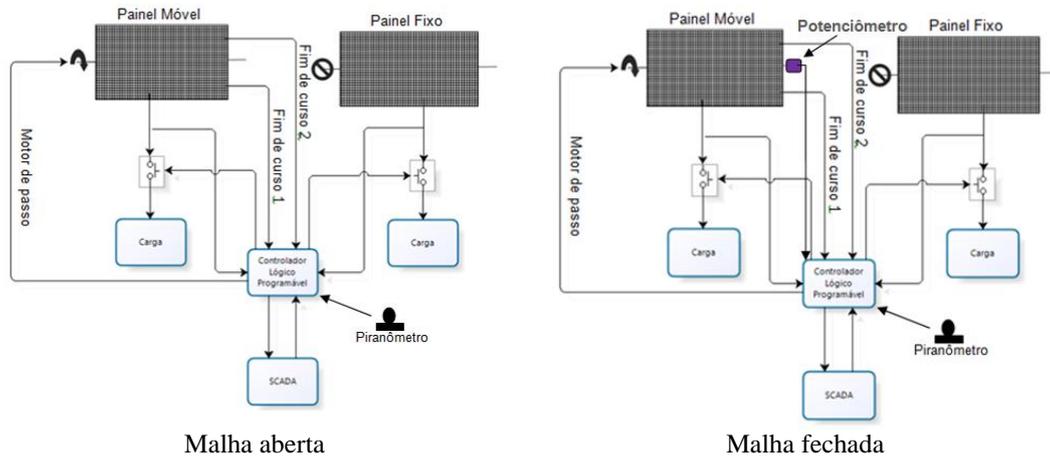


Figura 4 - Configurações de controle de posicionamento angular em malha aberta e malha fechada.

Para permitir uma análise nas mesmas condições meteorológicas, foi estabelecido o agrupamento dos dados quinzenalmente. Ou seja, nos primeiros quinze dias de Abril, Maio e Junho o dispositivo funcionou em malha aberta e nos demais dias em malha fechada. Em Julho o experimento foi realizado somente em malha fechada. A escolha do dia típico a ser analisado no intervalo de quinze dias foi baseada nas médias dos valores das irradiações obtidas no período.

Finalmente para realizar o balanço de energia do seguidor solar, os valores de geração elétrica do painel são comparados com o total de energia utilizada nos dispositivos de controle e acionamento do seguidor solar. Na Tab. 1 são observados os parâmetros de funcionamento utilizados no seguidor solar do LEA/UFC.

Tabela 1 – Parâmetros de funcionamento do seguidor solar.

Tempo (min)	Acionamento (nº de vezes em 12h)	Incremento angular
15	48	2,08
30	24	4,16
60	12	8,33

### 3.3 Funcionamento em malha aberta

O movimento de rotação do seguidor solar da Fig. 2(d), é baseado no tempo e contagem de pulsos. O funcionamento é iniciado quando o RTC (*Real Time Clock*) do CLP (*Controlador Lógico Programável*) registra 6h e o fim de curso FC1 encontra-se acionado. Após o início do funcionamento do seguidor solar, a contagem do tempo ocorre automaticamente durante o total de 12h (6 às 18h) e assim, a cada intervalo de tempo pré-estabelecido de 15, 30 e 60 minutos o CLP envia um sinal, através de contadores de pulsos, para o motor de passo incrementar o número de passos conforme a relação descrita na Eq. (1).

$$n^{\circ} \text{ pulsos} = \left( \frac{\varphi_{\text{painel}}}{360} \cdot d_{\text{mov}} \cdot Z_{\text{mov}} \right) \cdot 200 \quad (1)$$

Em que,

$n_{\text{pulsos}}$  - número de pulsos por rotação do motor de passo

$\varphi_{\text{painel}}$  - deslocamento angular do painel

- $d_{mov}$  - diâmetro da polia movida (mm)  
 $Z_{mov}$  - número de dentes da engrenagem movida  
 $d_{mot}$  - diâmetro da polia motora (mm)  
 $Z_{mot}$  - número de dentes da engrenagem motora

Ao acionar o fim de curso FC2 ou o RTC registrar 18 horas, o CLP envia um comando para que o seguidor solar retorne para posição inicial acionando o fim de curso FC1 (posição Nascente). Nessa condição um novo ciclo de rastreamento ocorrerá quando um novo registro do RTC estiver indicando o intervalo de 6 às 18 horas e 1 minuto.

### 3.4 Funcionamento em malha fechada

O funcionamento da configuração em malha fechada é baseado em comparação de dados pré-estabelecidos referentes ao número de posicionamentos desejados do seguidor solar (*set point* - SP), que correspondem aos valores dos incrementos estabelecidos (15, 30 e 60 minutos) e o sinal gerado pela posição atual do rastreador solar (variável do processo - PV).

Para gerar o sinal da posição atual, foi utilizado, como sensor de posição, um potenciômetro linear de 100  $\Omega$  alimentado por uma fonte de 5V. Ao rotacionar o eixo do potenciômetro, a resistência dos terminais de saída é alterada e consequentemente o sinal de tensão enviado à entrada analógica do CLP é modificado.

Foi estabelecida uma tabela de valores de *set-point* do posicionamento do seguidor solar, que quando comparado com o valor atual registrado no sensor de posição (leitura atual), induz três possibilidades distintas no programa implementado no CLP: posicionamento menor que leitura atual, posicionamento maior que leitura atual, ou posicionamento igual à leitura atual. Após o horário pré-estabelecido ser igual ao horário informado pelo RTC, o motor de passo é ativado no sentido horário ou anti-horário até que a condição de posicionamento seja igual à leitura atual.

Após o painel solar executar os incrementos angulares previstos, o seguidor solar retorna a posição inicial permitindo assim, o sistema de rastreamento iniciar um novo ciclo. Da mesma forma que o sistema em malha aberta, o retorno ocorre quando o fim de curso FC2 for ativado ou o RTC registrar 18 horas. Na Fig. 5 é observado o mapa conceitual do funcionamento do seguidor solar do LEA/UFC em malha fechada.

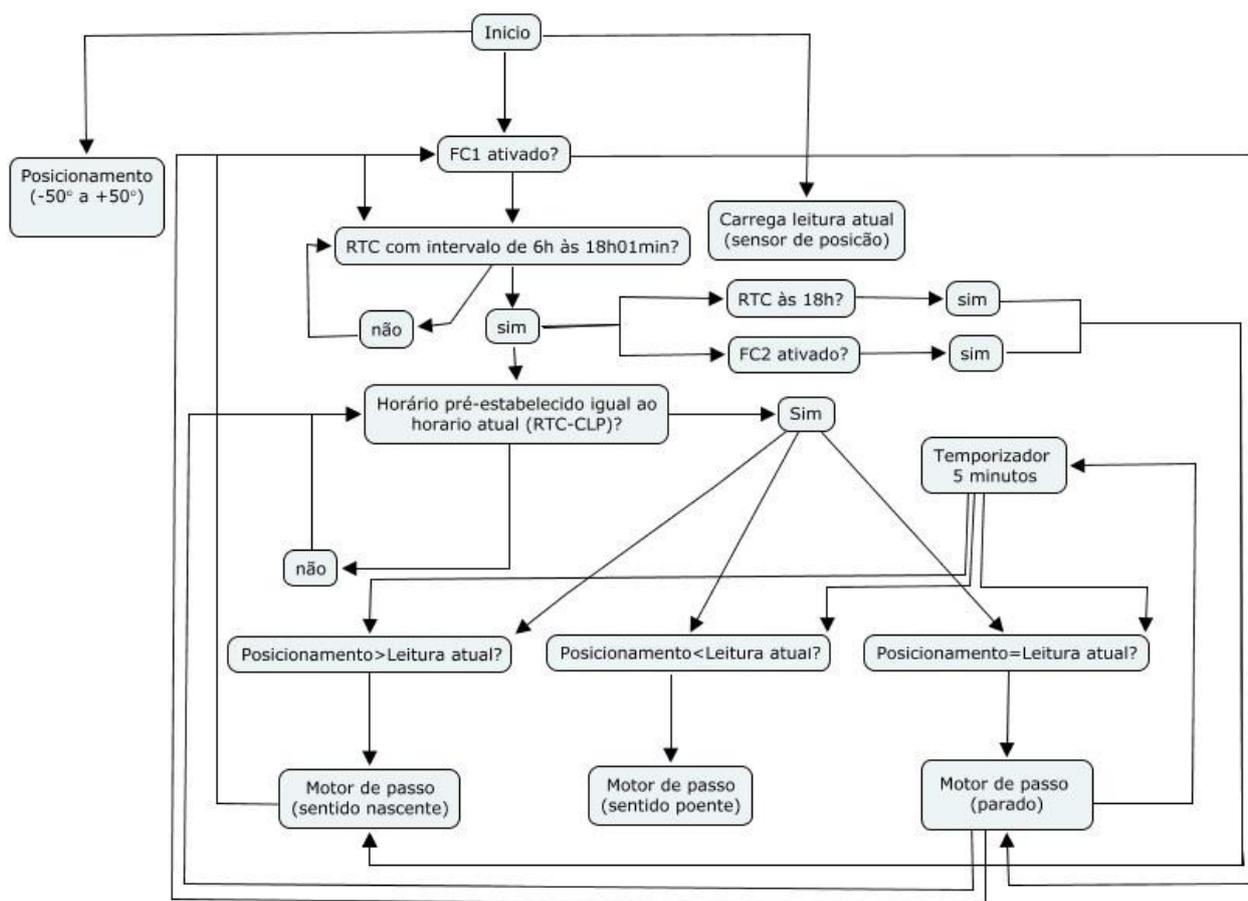


Figura 5 – Mapa conceitual do funcionamento do seguidor solar (malha fechada).

#### 4. ANÁLISE ENERGÉTICA

Para determinar a energia total fornecida no dia, foi realizada a integração numérica dos dados através do método trapezoidal descrita em Palm (2013), que efetua integração discreta utilizando os pontos de dados para criar trapézios. Trata-se de método que é adequado para a manipulação de conjuntos de dados com descontinuidades. Este método assume comportamento linear entre os pontos de dados. Entretanto, precisão pode ser reduzida quando o comportamento entre pontos de dados é não linear. Assim, a fim de permitir a análise com a integração discreta semelhante dos dados coletados nos intervalos de 15, 30 e 60 minutos, foram coletados dados de tensão e corrente a cada 60 segundos e agrupados a cada 30 minutos para calcular a potência fornecida pelos painéis FV com plataforma fixa e móvel.

Na Fig. 6, Fig. 7 e Fig. 8 são apresentados os gráficos da potência fornecida do painel móvel em malha aberta e painel fixo para os intervalos de posicionamento de 15, 30 e 60 minutos para os meses de Abril, Maio e Junho. Em Abril, os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha aberta fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo com atualização da posição angular foram 582,14 Wh/dia e 500,94 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o desempenho do painel móvel é superior ao fixo em 16,21%. Em Maio, os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha aberta fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo com atualização da posição angular foram 634,80 Wh/dia e 538,96 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o desempenho do painel móvel é superior ao fixo em 17,78%. Em Junho, os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha aberta fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo com atualização da posição angular de 60 minutos foram 620,57 Wh/dia e 514,07 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o desempenho do painel móvel é superior ao fixo em 20,72%.

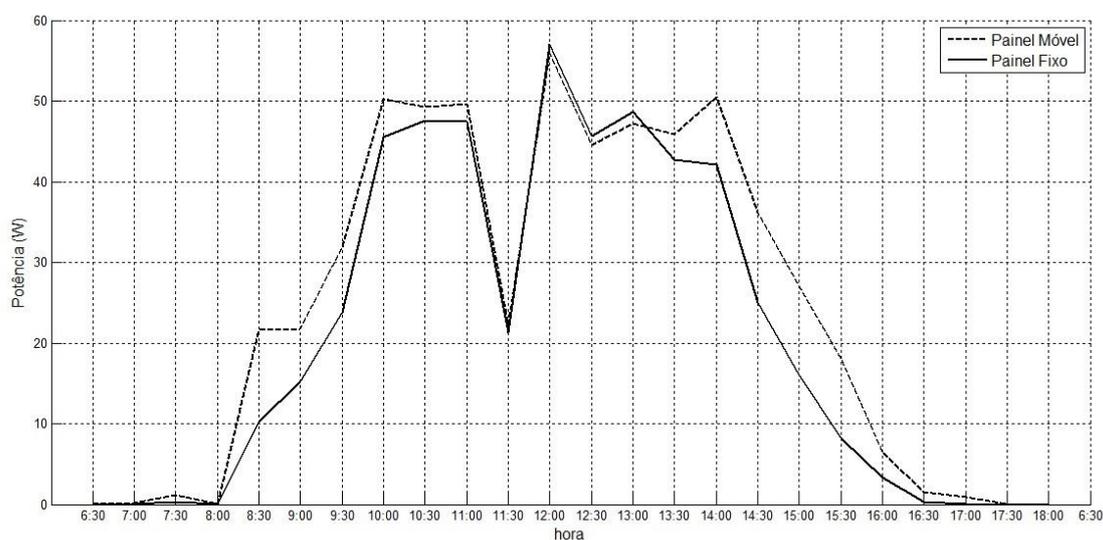


Figura 6 – Potência fornecida do painel móvel em malha aberta e painel fixo em Abril (15 minutos).

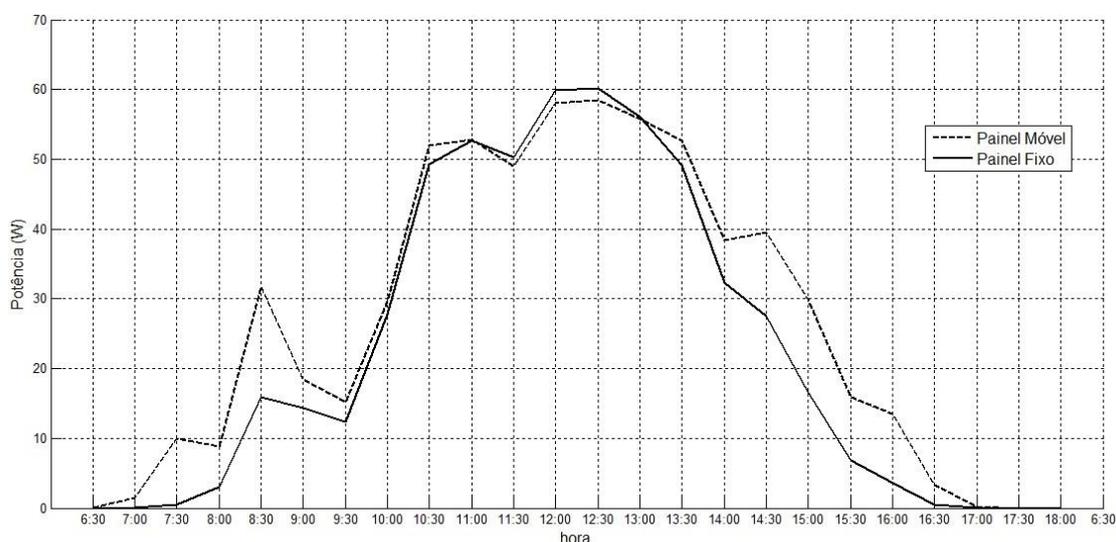


Figura 7 – Potência fornecida do painel móvel em malha aberta e painel fixo em Maio (30 minutos).

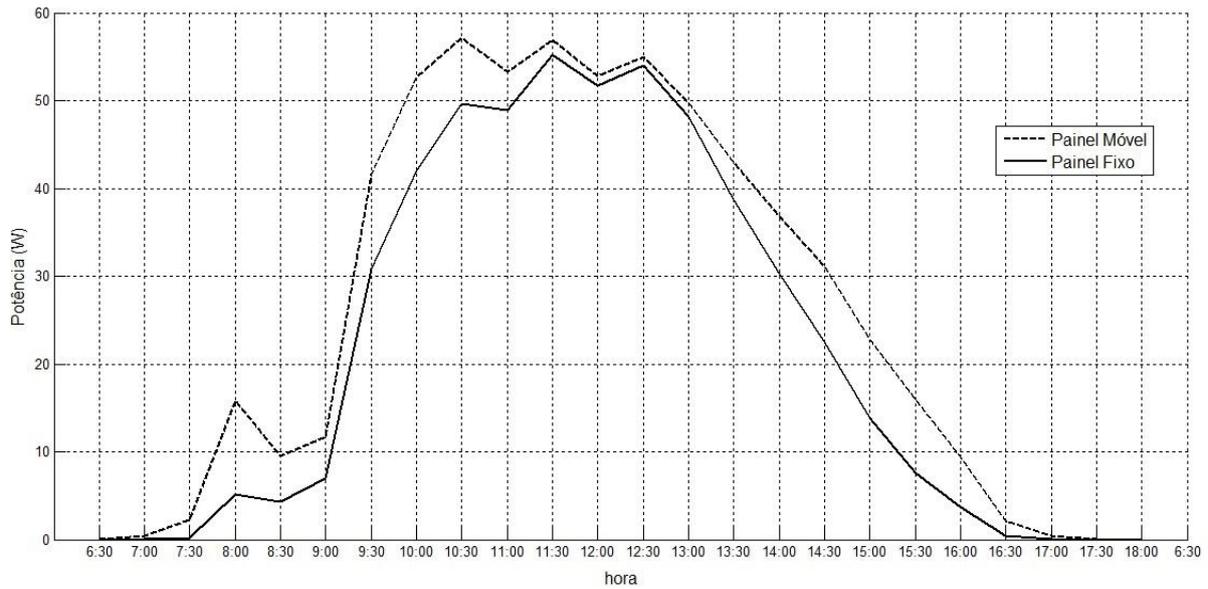


Figura 8 – Potência fornecida do painel móvel em malha aberta e painel fixo em Junho (60 minutos).

Na Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11 são apresentados os gráficos da potência fornecida do painel móvel em malha fechada e painel fixo para os intervalos de posicionamento de 15, 30 e 60 minutos para os meses de Abril, Maio e Junho. Os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha fechada fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Abril foram 618,85 Wh/dia e 512,03 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o desempenho do painel móvel é superior ao fixo em 20,86%. Os valores obtidos de energia elétrica com o sistema em malha fechada fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Maio foram 622,99 Wh/dia e 546,10 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o desempenho do painel móvel é superior ao fixo em 14,07%. Os valores obtidos de energia elétrica diária com o sistema em malha fechada fornecidos pelos painéis FV com seguidor solar e fixo em Junho foram 677,15 Wh/dia e 531,40 Wh/dia, respectivamente. Portanto, o desempenho do painel móvel é superior ao fixo em 27,42%.

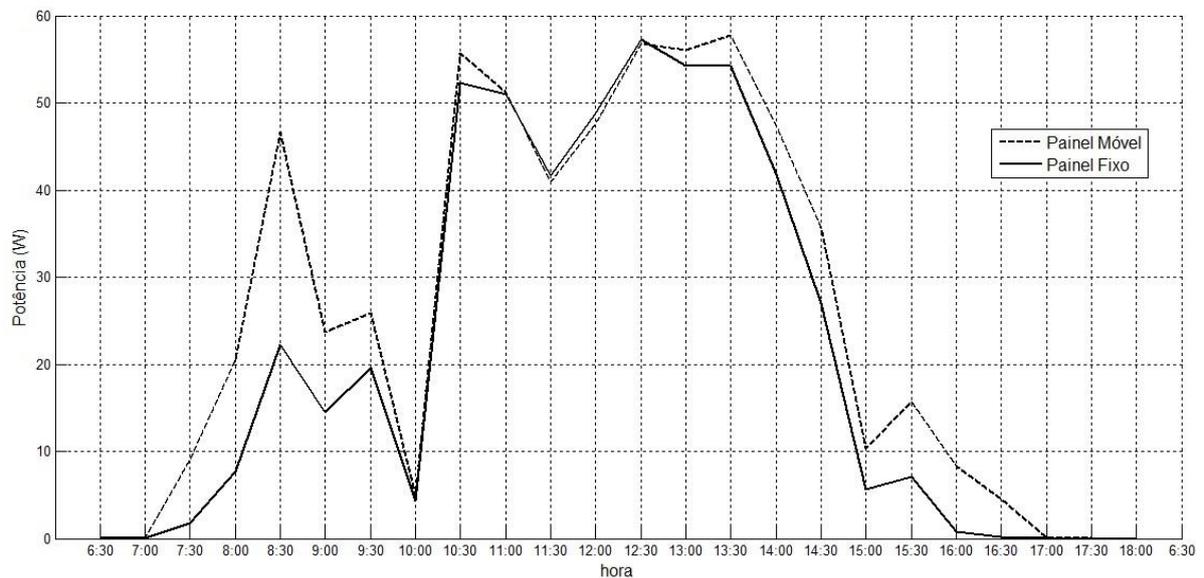


Figura 9 – Potência fornecida do painel móvel em malha fechada e painel fixo em Abril (15 minutos).

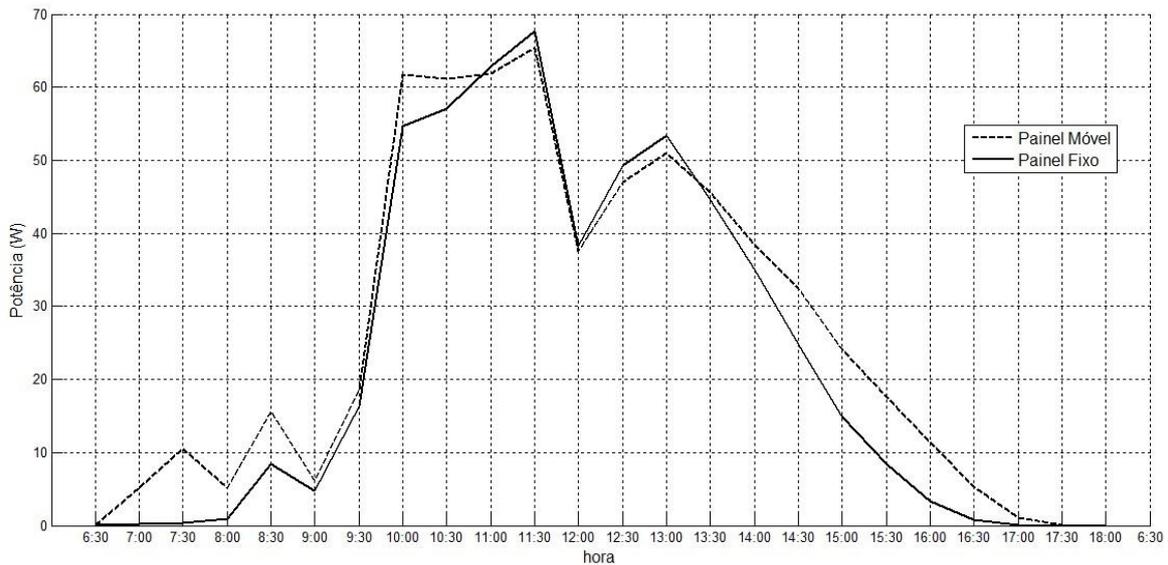


Figura 10 – Potência fornecida do painel móvel em malha fechada e painel fixo em Abril (30 minutos).

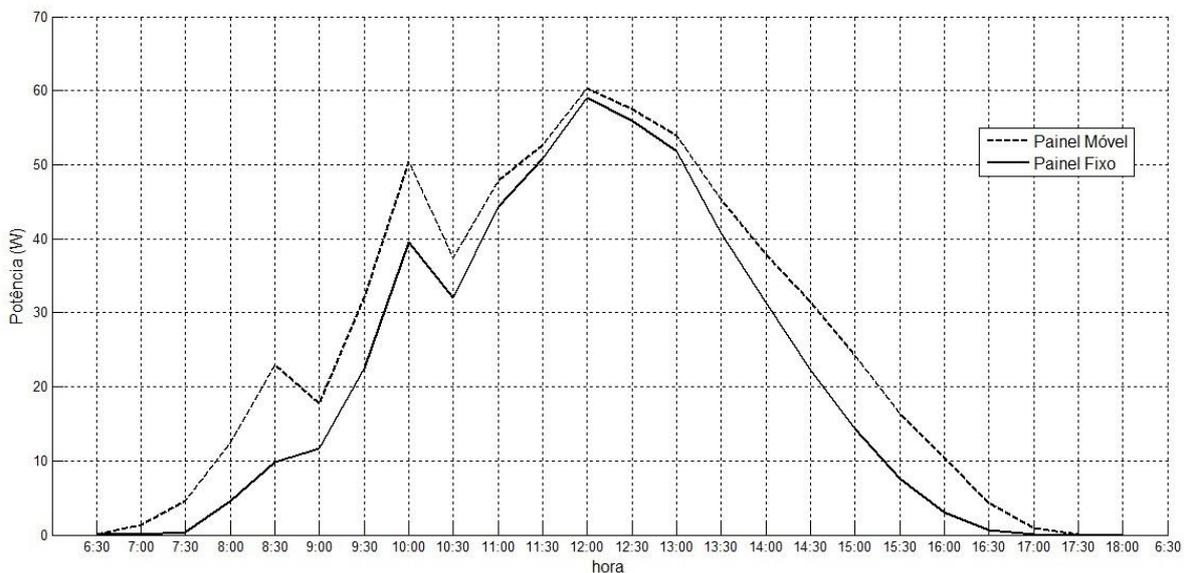


Figura 11 – Potência fornecida do painel móvel em malha fechada e painel fixo em Abril (60 minutos).

Considerando o funcionamento diário do motor de passo e do CLP em 0,0059 horas e 24 horas, respectivamente. Foram calculadas as potências diárias consumidas do sistema em malha aberta, sendo 0,14 W do motor de passo e 73,728 W do CLP. Devido a imprevisibilidade do erro do posicionamento angular do seguidor solar no sistema em malha fechada foi estabelecido a correção da posição angular a cada 5 minutos. Portanto foi estipulado um acréscimo de consumo de potência diária consumida em média de 10 W.

O ganho líquido do painel móvel em malha aberta em relação ao painel fixo para o intervalo de 15 minutos (Abril), 30 minutos (Maio) e 60 minutos (Junho) foi de 1,5%, 4,1% e 6,3%, respectivamente. Em malha fechada o ganho líquido do painel móvel em relação ao painel fixo foi de 4,8%, -1,3%, 11,3%, respectivamente.

O ganho líquido negativo foi ocasionado pela baixa irradiância do dia típico de Maio nos períodos da manhã e/ou tarde, onde ocorrem as vantagens da captação de energia solar dos painéis com seguidores.

## 5. CONCLUSÕES

O seguidor solar instalado na planta de geração de eletricidade através de painéis fotovoltaicos do Laboratório de Energias Alternativas permitiu avaliar o ganho de desempenho na geração de energia elétrica do painel móvel em relação ao painel fixo, com intervalos de atualização da posição angular de 15, 30 e 60 minutos em malha aberta e malha fechada com aplicação de carga fixa.

Considerando os sistemas com painel móvel em malha aberta e malha fechada, os maiores ganhos em relação ao painel fixo foram 20,72% e 27,42%, respectivamente.

Entretanto, considerando a média da energia elétrica gerada nos meses de Abril, Maio e Junho para os sistemas em malha aberta e fechada, os ganhos obtidos foram aproximadamente 18,24% e 20,78%, respectivamente.

Os resultados indicam ainda que a atualização da posição angular a cada 60 minutos teve o melhor rendimento, porém por tratar-se de um estudo que envolve situações com incertezas climáticas, pressupõe-se que o ganho e intervalo de atualização da posição angular do painel móvel possam sofrer alterações.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL SOLAIR., 2013. Potencial solar e eólico. Disponível em: < <http://www.brasilsolair.com.br/potencial-solar-e-eolico>>. Acesso em 10 Ago. 2015.
- PALM, III J. W., 2013. Introdução ao MATLAB para engenheiros. 3. ed, Nova Iorque: AMGH, 557 p.
- PINTO A.; MACAGNAN M.; ZILLES R.; LEHMANN J., 2010. Descrição de seguidores solares e sua aplicação em centrais fotovoltaicas conectadas à rede, III CBENS Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém - Pará.
- VIANA T.S.; RUTHER R.; MARTINS F.R.; PEREIRA E.B., 2011. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation, Solar Energy, vol. 85, pp. 486-495.

## PERFORMANCE EVALUATION MONOAXIS SOLAR TRACKER FOR PHOTOVOLTAIC STAND-ALONE SYSTEMS.

**Abstract.** *The Northeast region of Brazil presents favorable conditions for photovoltaic solar energy harvesting because its favorable location close to the equator, and because there are few variations in average solar radiation throughout the year. This article presents the results of a comparative study of electricity production for a stationary photovoltaic systems facing true north at 15 degrees to the horizontal plane, and a mobile system associated with a monoaxis solar tracker. The evaluation was performed at intervals of angular positions of 15, 30 and 60 minutes using the solar tracker in two configurations: open loop and closed loop control. An average irradiance day was selected to evaluate each system at different intervals and angular position. Was observed an increase of 27.42% in the performance of electricity generation of the solar tracker system for angular position intervals of 60 minutes in closed-loop.*

**Key words:** *Photovoltaic Solar Energy, Tracking Solar, Power Generation*