



ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE UM SISTEMA SOLAR COM RASTREIO E UM FIXO

¹ Daniel Silva Lima, Autor;

² Sanderson Aron Moura Gurgel Sinedino de Oliveira, Autor;

¹ UFERSA, daniel_silva_lima@outlook.com

² UFERSA, sandersonaron@gmail.com

Resumo

A energia solar é uma fonte alternativa às fontes tradicionais que vem ganhando espaço ano após ano. A partir da conversão da radiação solar incidente em um módulo fotovoltaico é possível obter energia elétrica. No entanto a baixa eficiência na conversão ainda é um ponto negativo para consolidação da tecnologia solar fotovoltaica. O presente trabalho teve como objetivo construir um sistema fotovoltaico com seguimento solar em um eixo e compará-lo a um sistema estático. Foram utilizados sensores, resistores, dispositivos elétricos, equação para descrever a trajetória do sol no caso do sistema com seguidor solar e um Arduino® Mega para armazenamento, sensoriamento, controle e leitura dos dados das cinco horas da manhã as seis horas da noite. Os resultados do sistema com rastreo se sobressaíram em relação ao sistema estático, onde foi constatado um ganho de até 23% na geração de energia. Diante disso, foi possível observar que o sistema com rastreo solar é uma opção a ser considerada em sistemas fotovoltaicos.

Palavras-chave: energia solar, eficiência, rastreo solar.

Abstract

Solar energy is an alternative source like traditional sources that has been gaining place year after year. From the conversion of incident solar radiation into a photovoltaic module it is possible to obtain electric energy. However the low conversion efficiency is still a negative point for consolidation of solar photovoltaic technology. The objective of this work was to construct a photovoltaic system with solar tracking on an axis and compare it to a static system. We used sensors, resistors, electrical devices, equation to describe the trajectory of the sun, in the case of the system with solar tracker and a Arduino® Mega for storage, sensing, control and reading data from five o'clock in the morning like six o'clock at night. The results of the system with tracing have stood out in relation to the static system, where a gain of up to 23% in the generation of energy was found. Given this, it was possible to observe the system with solar screening and an option to be considerable in photovoltaic systems.

Keywords: solar energy, efficiency, solar tracking..

1 Introdução

O amplificador operacional (ou simplesmente “amp-op”) é provavelmente o dispositivo mais bem-sucedido na área de circuitos analógicos, sendo estudado especialmente na disciplina de Eletrônica Analógica II em cursos técnicos de Eletroeletrônica e de graduação em Engenharia Elétrica. O amp-op é um circuito de corrente contínua de muitos estágios com entrada diferencial, cujas características se aproximam das de um amplificador ideal, tais como: ganho infinito, resposta em frequência infinita, tensão de offset nula, resistência de saída nula, resistência de entrada infinita (PERTENCE, 2003).

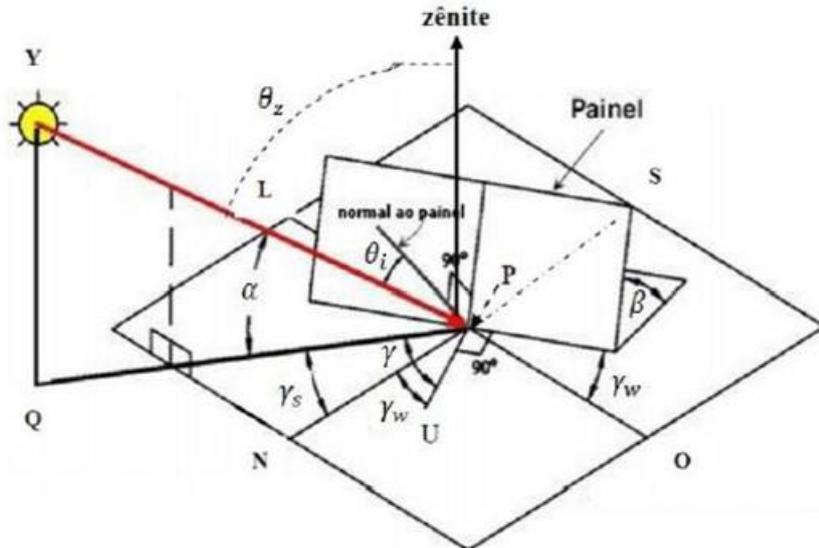
Dentre as variedades de amp-ops, e suas diversas aplicações, há um conhecido como amplificador de instrumentação, sendo este um elemento essencial em qualquer sistema de aquisição de sinais de pequenas amplitudes. O que o difere de um amplificador operacional é que o amplificador de instrumentação deve ter alta Razão de Rejeição de Modo Comum (do inglês, Common Mode Rejection Ratio - MCRR) a uma taxa de pelo menos -90 decibéis (dB), ou seja, ser capaz de rejeitar ruídos externos comuns em amplitude e frequência. Outra diferença básica é que aos amplificadores operacionais deve ser incorporada uma malha de realimentação para que eles operem de forma controlada, ao passo que os amplificadores de instrumentação já são estruturas intrinsecamente realimentadas (DAL FABRO, 2002).

Três configurações básicas do amp-op é apresentado na Figura 1, onde: em (a) é apresentada a configuração onde o sinal de saída é uma réplica da entrada, porém com ganho de amplitude e mesma fase; em (b) a saída é uma réplica amplificada da entrada, mas com a fase invertida; e em (c) a saída do amplificador é a subtração entre os dois sinais aplicados em suas entradas, ela é utilizada na construção de amplificadores de instrumentação (CUNHA, 2012).

2 Posição do sol

Para implementação de um sistema de rastreamento do sol é necessário inicialmente um estudo sobre a posição do Sol ao longo do dia e do ano naquele local. A posição para cada instante de tempo pode ser determinada a partir dos ângulos formados entre os raios solares incidentes, o módulo fotovoltaico e os eixos cardinais Norte-Sul e Leste-Oeste (VIEIRA, 2014). Os ângulos estão ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Ângulos formados entre os raios incidentes, eixos cardeais e módulo fotovoltaico.



Fonte: RIBEIRO; PRADO; GONÇALVES, 2012.

A posição do sol pode ser descrita a partir dos ângulos de azimute γ_w e altitude solar α . Relacionando tais ângulos visualizados na figura 1 junto ao ângulo de declinação solar δ é descrita a equação que descreve o ângulo de ajuste do módulo fotovoltaico que maximiza a conversão dos raios solares incidentes em energia elétrica. Segundo Masters (2004), o ângulo α é dado pela equação 1 onde L representa a latitude do local.

$$\alpha = 90^\circ - L + \delta \quad (1)$$

A partir do ângulo de altitude solar é possível determinar a inclinação β que melhor adequa-se ao módulo fotovoltaico para maximização da conversão. A equação 2 descreve o ângulo de inclinação β visualizado na figura 1.

$$\beta = 90^\circ - \alpha \quad (2)$$

A identificação do ângulo de inclinação para diferentes posições do sol no decorrer do dia possibilita a utilização de um seguidor solar para que os raios solares incidam no módulo perpendicularmente otimizando o sistema fotovoltaico.

3 SEGUIDORES SOLARES

Um sistema de seguimento solar pode ser utilizado em basicamente todas as aplicações que usem energia solar, ou seja, tanto em painéis fotovoltaicos como em coletores planos e concentradores solares usados no aquecimento de água. Existem casos em que um sistema de seguimento solar, apesar de incrementar em cerca de 20% o preço total de um sistema de geração fotovoltaica de energia, pode vir a aumentar em algo em torno de 40% as receitas geradas. Os seguidores fotovoltaicos também apresentam geralmente um baixo custo de manutenção (GIL et al., 2009).

Considerando as atenuações da atmosfera, o uso de rastreador de sol leste -oeste apresenta a vantagem teórica de aumentar em até 48% a capacidade de aproveitamento dos raios solares para conversão em energia em dias sem nuvens. Porém, a tecnologia fotovoltaica se destaca pelo fato de possuir grande robustez associada aos painéis fotovoltaicos e sua reduzida manutenção (SHAYANI, 2006). Para a montagem de um sistema com rastreo é necessário inicialmente um estudo da área de implantação da tecnologia junto a um sistema de controle bem estruturado.

Existem formas diferentes de se obter o controle de seguimento. O controle pode ser realizado em malha aberta, ou seja, através de algoritmos que efetuam o cálculo da posição do sol, em malha fechada, com o uso de sensores ou ainda de forma mista, como o nome já diz, efetua a interação entre sensores e o algoritmo (CORTEZ, 2012). Em uma configuração mais completa, um sistema de seguimento pode ser composto por:

- Aquisição: Responsável por fornecer os dados de latitude, longitude e por disponibilizar dados relativos à posição do Sol. A hora solar é bastante utilizado para a inicialização da orientação do painel fotovoltaico;

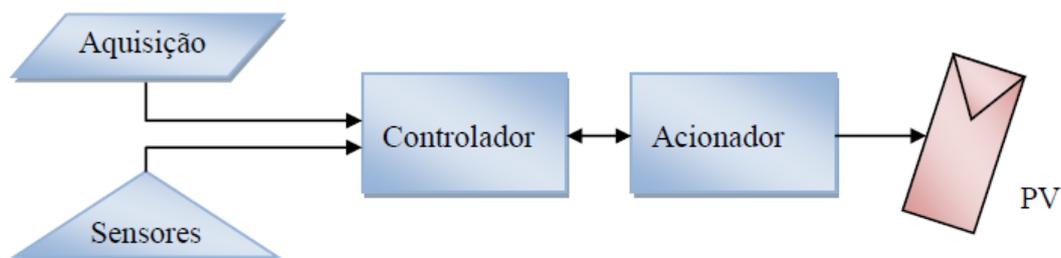
- Sensores: Responsável por detectar a posição do sol durante o dia, sem a necessidade das coordenadas solares e a hora solar, podendo ser fotosensores de tipos como: LDR (do inglês Light Dependent Resistor), também denominado de fotoresistor ou resistor dependente de luz; fototransistor; fotodiodo; entre outros;

- Controlador: Circuito elétrico com ou sem a presença de microcontroladores, onde são processados os sinais emitidos dos sensores de acordo com a lógica de controle ou programação (quando se faz uso de microcontroladores) e de onde saem os sinais de comando para os atuadores;

- Acionador: Sua função é realizar a movimentação do sistema a partir dos sinais vindos do controlador, sendo geralmente utilizados motores de corrente contínua.

A Figura 2 ilustra a composição de um sistema de rastreo solar a partir de um diagrama.

Figura 2 – Esboço de um diagrama em blocos do sistema de rastreo solar.



Fonte: RIBEIRO; PRADO; GONÇALVES, 2012.

4 Materiais e métodos

O presente trabalho visa inicialmente a elaboração de uma equação junto a um sistema de seguimento solar que efetuará o acionamento de um motor de passo, este último está acoplado a uma estrutura com um grau de liberdade. O intuito é realizar o acompanhamento da posição do sol durante o dia para uma localidade específica no caso trata-se da cidade de Mossoró-RN. É realizado também a comparação entre um sistema estático e outro móvel para observar a influência de um seguidor solar quanto a geração de energia de um sistema fotovoltaico.

Os materiais necessários para realização do experimento foram:

- a) Resistores variados para dissipar potência gerada pelos painéis e para atuar como divisores de tensão necessários dado que o Arduino opera na faixa entre 0V a 5V;
- b) Dois módulos fotovoltaicos da Suntech modelo STP020S-12Cb;
- c) Um suporte para fixação do sistema móvel;
- d) Um motor de passo de corrente contínua para movimentação do painel fotovoltaico;
- e) Três sensores de corrente modelo ACS712ELC-30 para medição das correntes consumidas pelos resistores e consumida pelo motor de passo;
- f) Um sensor de temperatura e umidade modelo DHT11;
- g) Sensores LDR's para medir radiação incidente;
- h) Um Arduino® Mega;
- i) Um SD shield 2.0 junto a um cartão de memória para armazenamento dos dados;
- j) Além de bateria para alimentação do motor de passo e fiação em geral.

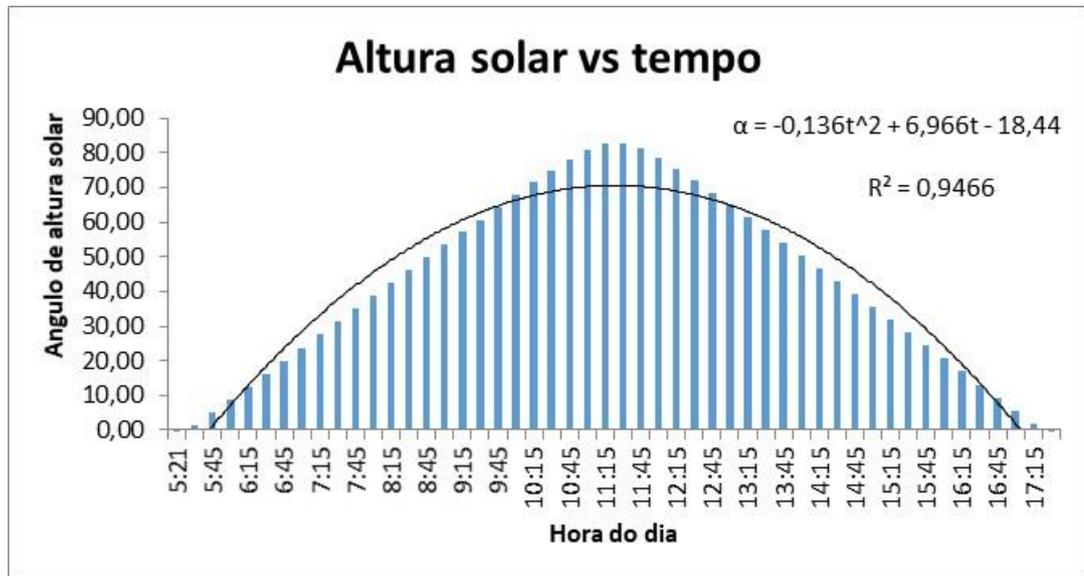
A estrutura e o motor de passo junto ao seu drive foram reaproveitados de experimentos anteriores. E alguns itens como sensores de corrente, fios de conexão e resistências foram requeridos através de recursos financeiros próprios. Todos os outros materiais foram disponibilizados pela UFERSA.

O posicionamento do módulo fotovoltaico do sistema móvel foi realizado via uma equação que descreve a trajetória do sol em relação à hora do dia. Para gerar tal equação inicialmente observou a relação entre posição do sol e hora do dia empiricamente e posteriormente foi usado o Sun Earth Tools, que gera o ângulo de altura solar para várias horas do dia, neste caso foram obtidos dados de 15 em 15 minutos a partir das 6 horas da manhã até pouco mais das 18 horas da noite.

Através das equações 1 e 2 descritas anteriormente foi possível determinar a inclinação do painel para determinada hora do dia. A partir disso foi aplicado o modelo de regressão polinomial de grau dois para traçar uma curva que relacione o ângulo de altura solar e a hora do dia. A escolha por tal modelo de regressão se deve ao fato de observar através

dos dados obtidos que a relação entre a posição do sol através do ângulo de elevação descrevia uma trajetória parabólica. A figura 3 mostra o modelo matemático escolhido junto a função que descreve tal relação entre a variável dependente que no caso é o ângulo de altura solar e a variável independente que neste caso é a hora do dia.

Figura 3 – Relação do ângulo de altura solar com a hora do dia.



Fonte: Autoria Própria, 2016

Observa-se um coeficiente de determinação de 94,6%, ou seja, quase 95% da variável dependente, neste caso, da altura solar podem ser explicados pelos regressores presentes na equação 3.

$$\alpha = -0,136t^2 + 6,966t - 18,44^\circ \quad (3)$$

Relacionando as equações (2) e (3) é obtido a equação 4 descrita a seguir.

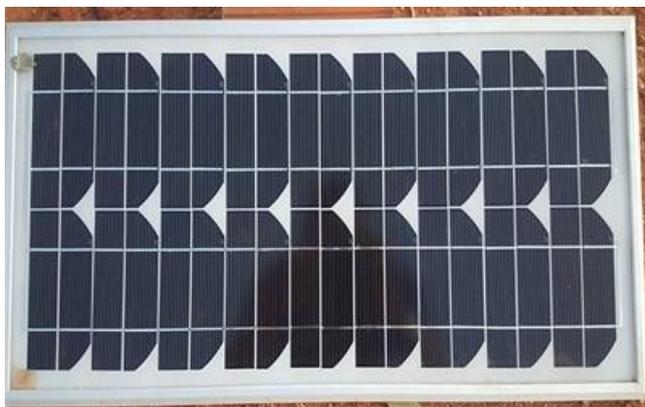
$$\beta = 90^\circ - 0,136t^2 + 6,966t - 18,44^\circ \quad (4)$$

Logo, o ângulo de inclinação do painel móvel irá descrever uma trajetória parabólica para que os raios solares incidentes atinjam a superfície do painel perpendicularmente. Então, é necessário relacionar o ângulo de inclinação do painel com a quantidade de passos que o motor irá executar via o controle do Arduino®. Sabendo que um passo do motor HT23-397 equivale a 1,8° e que a estrutura permite que o painel tenha uma variação angular de 90° então através de uma divisão temos que o número de passos executados durante o dia para que ocorra o rastreamento do sol é igual a 50. A variação do ângulo de inclinação do módulo do sistema móvel ocorrerá de 15 em 15 minutos onde o primeiro passo do motor era realizado as 8:00h da manhã enquanto o último passo era realizado as 17:45h.

O sistema com o módulo fotovoltaico fixo foi inserido diretamente ao chão a uma inclinação de aproximadamente 15 graus. Com isso, após a fase de estudos e aquisição dos materiais e com todo o sistema de automação desenvolvido foram realizados os testes entre

os dias 19 a 21 de outubro de 2016 na cidade de Mossoró-RN, onde ambos os sistemas foram implantados no local já caracterizado na noite do dia 18 de outubro de 2016. A prática foi finalizada no dia 21 de outubro e por volta das 18 horas o sistema foi retirado de seu funcionamento para posterior análise dos dados coletados. As figuras 4 e 5 ilustradas a seguir mostram a inserção de ambos os sistemas na localidade.

Figura 4 – Módulo fotovoltaico fixo.



Fonte: Aatoria Própria, 2016.

Figura 5 – Sistema fotovoltaico móvel.



Fonte: Aatoria Própria, 2016.

Em ambos os módulos foram adicionados resistores apropriados de aproximadamente 20Ω para dissipar a potência gerada pelo painel durante o seu funcionamento e foi adicionado um cooler no recipiente em que estava contido o Arduino® Mega para evitar grandes aumentos de temperatura e futuras perdas de dados. Os testes foram realizados ao mesmo tempo para ambos os sistemas em um período de 3 dias. O desempenho foi monitorado 24 horas durante os 3 dias, mas os dados fornecidos pelos sensores foram analisados entre as

5:00h e 17:30h, tal intervalo foi determinado pois foi perceptível que fora desse intervalo a geração de energia era desprezível.

5 Resultados e discussões

A partir do levantamento e armazenamento dos dados de tensão e corrente de ambos os sistemas foi possível estimar a potência e energia gerada por ambos os sistemas. A tabela 1 a seguir mostra o desempenho dos dois sistemas assim como o ganho do sistema móvel quando comparado ao sistema. Além do desempenho e do ganho é verificado as condições climáticas em cada dia do experimento.

Tabela 1 – Comparativo entre os sistemas móvel e fixo.

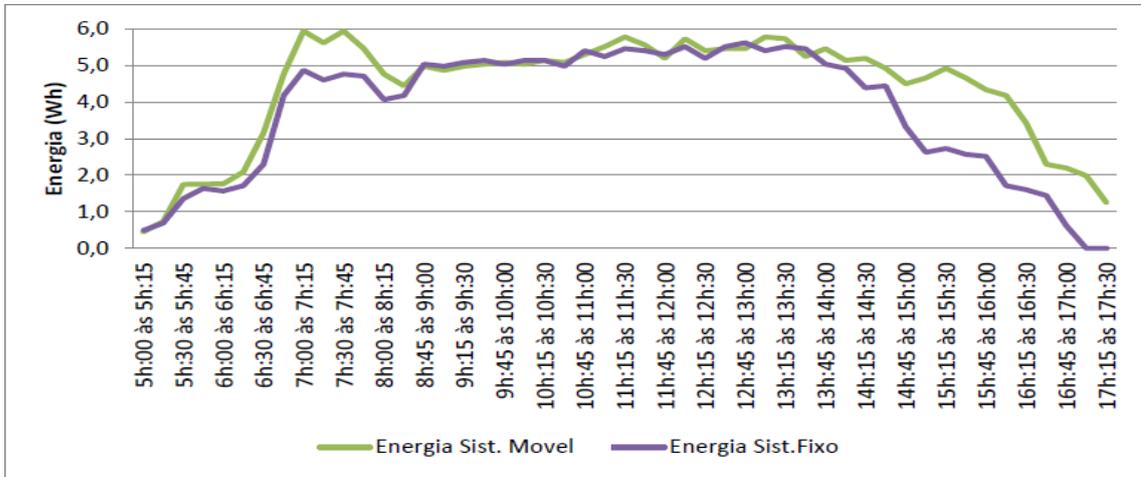
Dia	Energia Sist. Móvel (Wh)	Energia Sist. Estát. (Wh)	Ganho (%)	Condições meteorológicas
1	214,25	184,33	16,23	Nuvens esparsas
2	195,29	176,71	10,51	Nuvens esparsas
3	163,83	132,74	23,42	Parcialmente Nublado
Média	191,12	164,59	16,12	-

Fonte: Autoria Própria, 2016.

Observa-se na Tabela 1 que nos três dias de ensaio, o sistema móvel gerou mais energia do que o sistema fixo, onde o ganho máximo ficou em torno de 23%. Já o ganho médio foi de aproximadamente 16%. Ainda na tabela 1 é possível perceber que no dia nublado o desempenho do sistema móvel perante o sistema fixo foi maior do que nos outros dois dias. Vale ressaltar que a forma de rastreamento via equação do tempo não sofre interferência da nebulosidade, pois o seguimento do sol é realizado em relação a sua posição com o tempo e não em relação à luminosidade. Esta é uma das vantagens deste tipo de rastreamento.

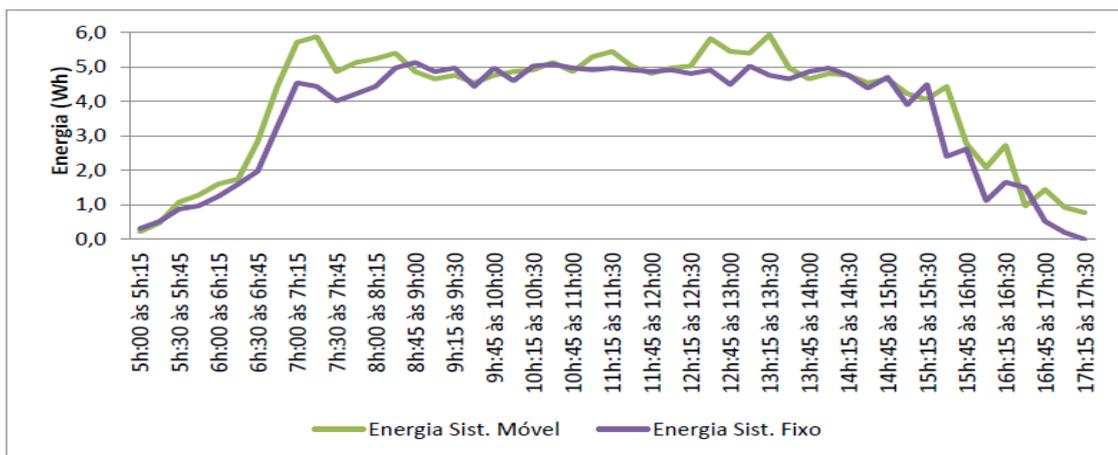
Mesmo com um ganho próximo a 23%, é observado que a energia gerada diminui com a nebulosidade, isso ocorre devido à geração de radiação difusa que não é aproveitada na conversão para energia elétrica. As figuras 6, 7 e 8 mostram graficamente a comparação da quantidade de energia gerada pelos sistemas.

Figura 6 - Comparação do desempenho dos sistemas móvel e estático no dia 1.



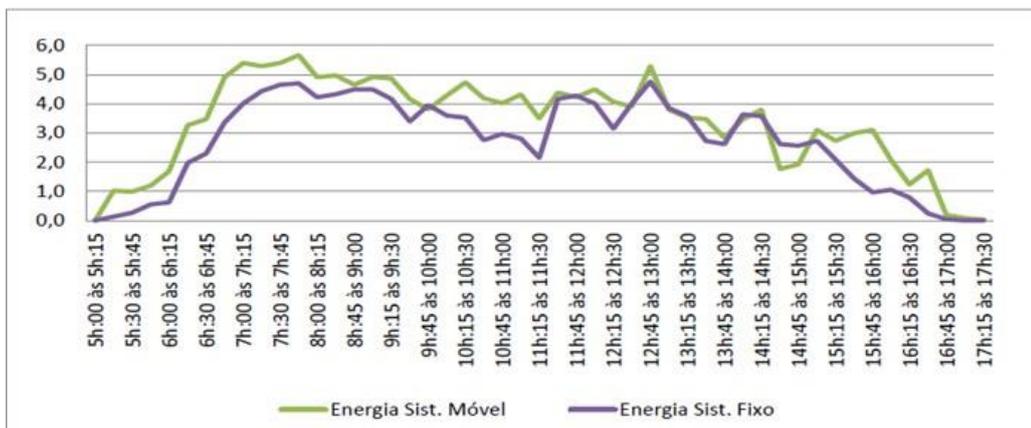
Fonte: Autoria Própria, 2016.

Figura 7 - Comparação do desempenho dos sistemas móvel e estático no dia 2.



Fonte: Autoria Própria, 2016.

Figura 8 - Comparação do desempenho dos sistemas móvel e estático no dia 3



Fonte: Autoria Própria, 2016.

As figuras 6, 7 e 8 mostram que a energia gerada pelo sistema móvel esteve na maioria das vezes superior à energia gerada pelo sistema estático, onde essa vantagem era bem perceptível no começo da manhã quando a radiação já existia de tal forma que o painel móvel estava bem posicionado para captação dos raios solares incidentes assim como após as 15 horas quando o sol começa a se pôr em Mossoró-RN para tal época do ano.

A diminuição na radiação e variação do ângulo de incidência dos raios solares acarretava um decréscimo de energia gerada. É observado que o rendimento superior do sistema móvel em relação ao fixo ocorreu, mas sem grandes diferenças, devido a fatos como o sistema ser composto apenas por um módulo fotovoltaico e as condições de alta incidência dos raios solares existentes em Mossoró, logo o rendimento do móvel quando comparado ao fixo é de baixo ganho.

Vale ressaltar que em nenhum momento ocorreu a desorientação do painel, o mesmo sempre esteve seguindo a equação 4 descrita anteriormente, tal fato pode ser observado quando comparamos o desempenho dos sistemas fixo e móvel no dia parcialmente nublado, nesse dia ocorreu o maior ganho do sistema com rastreamento em relação ao fixo. Caso o rastreamento fosse realizado com sensores LDR's poderia ocorrer justamente a desorientação do painel móvel diminuindo assim a incidência dos raios solares no painel fotovoltaico.

6 Conclusões

O sistema fotovoltaico com rastreamento solar mostra-se uma alternativa de baixo custo para aumentar a eficiência dos geradores fotovoltaicos, ou seja, eleva a energia produzida pelo sistema. A pesquisa comparou dois sistemas, um fixo e outro acoplado ao seguidor solar, com o objetivo de observar experimentalmente a melhora do sistema ao seguir o sol durante o dia.

Foi possível concluir que o ganho médio de aproximadamente 16% do sistema com mobilidade em um eixo em relação ao fixo é satisfatório quando comparado a outros trabalhos inseridos nas mesmas condições climáticas presentes na literatura. Ambos os sistemas mostram que a diminuição da umidade relativa do ar e o aumento da temperatura estiveram sempre acompanhando o aumento de energia gerada pelos painéis fixo e móvel durante os dias de experimento. A potência gerada nos dias 19 e 20 de outubro eram sempre superiores a potência nominal do painel, fato ocorrido entre outros motivos devido à radiação elevada a qual o trabalho estava inserido interferindo diretamente na corrente gerada pelo módulo fotovoltaico.

Diferenças significativas na potência gerada pelos sistemas eram visualizadas no início da manhã e após as 15 horas. No dia parcialmente nublado o sistema móvel apresentou

ganho médio de quase 23,4 % em relação ao sistema fixo, neste dia ocorreu a maior diferença de rendimento entre os sistemas móvel e fixo.

Referências

ARDUINO, Mega. Disponível em: < [http://arduino .cc/em /Main /arduino Board Mega](http://arduino.cc/em/Main/arduino%20Board%20Mega) >. Acesso em: 15 de Junho de 2017.

CORTEZ, Ramiro José Monteiro. **Sistema de Seguimento Solar em Produção de Energia Fotovoltaica. Portugal**, 2012. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia do Porto – FEUP.

LIMA, Daniel Silva. **Análise comparativa entre um sistema solar fotovoltaico fixo e um móvel**. Brasil, 2016. Monografia de Graduação. Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA.

MASTERS, Gilbert M. **Renewable and efficient electric power systems**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

RIBEIRO, Sandro Carneiro; PRADO, Pedro Paulo Leite do; GONÇALVES, João Bosco. Projeto e Desenvolvimento de um Rastreador Solar para Painéis Fotovoltaicos. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 11., 2012, Rio de Janeiro. Artigo. Rio de Janeiro: Associação Educacional Dom Bosco, 2012. v. 1, p. 1 - 10.

SHAYANI, R. A. **Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica**, Publicação PPGENE.DM-265/06, v Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2006, p.58.

VIEIRA, R. G. **Análise comparativa do desempenho entre um painel solar estático e com rastreamento no município de Mossoró-RN**. 2014. 88f. Dissertação (Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação) - Universidade Federal Rural Do Semi-Árido, Mossoró-RN.