

Utilização de Seguidores Solares Aplicados a Painéis Solares: Construção e Análise

Adriano da Silva Antônio¹, Gabriel Akira Gomes Ribeiro³ e Heverton Augusto Pereira^{1,2}

¹ Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Viçosa
Av. P. H. Rolfs s/nº, 36570-000
Viçosa, MG, Brasil
adriano.antonio@ufv.br

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901,
Belo Horizonte, MG, Brasil
hevertonaugusto@yahoo.com.br

³ Equatorial Energia S.A.
São Luís do Maranhão, Brasil
gabrielakirag@yahoo.com.br

Resumo — A potência elétrica gerada por um painel fotovoltaico está diretamente relacionada com a radiação solar incidente sobre a placa. Para otimizar a produção de energia então é necessário um sistema capaz de seguir o sol durante o dia, fazendo com que os raios solares sempre incidam perpendicularmente ao plano do painel. Este trabalho consiste em projetar um protótipo que possa realizar esta tarefa, além de construir um software no Matlab capaz de fazer uma previsão de como será o nível de radiação solar máxima teórica em um determinado dia.

Palavras-chaves — Radiação solar, painel fotovoltaico, seguidor solar.

I. INTRODUÇÃO

A busca por sistemas alternativos de geração de energia é uma constante, devido principalmente ao aumento do consumo e a atual dependência mundial de geração de energia através de fontes não renováveis.

É neste contexto que se insere a energia gerada pelo sol como uma das principais fontes alternativas, limpa e renovável. A energia solar chega a superfície terrestre em larga escala, porém seu uso é ainda limitado, devido principalmente a questões políticas e econômicas.

Apesar de ainda hoje, não ser possível afirmar se a energia solar será a solução definitiva para o problema energético mundial, o incentivo e desenvolvimento de tecnologias nesta área vem aumentando a cada ano e as estimativas mostram um crescimento robusto para a próxima década.

O desempenho de um sistema de geração de energia elétrica com células fotovoltaicas está diretamente relacionada às condições climáticas [1]. A radiação solar incidente e a temperatura são variáveis que afetam diretamente a potência máxima disponível em um painel fotovoltaico [2]- [3].

O sol possui um movimento diário o que prejudica a captação da radiação por dispositivos estáticos [4]. Para aumentar a absorção da energia proveniente do sol são necessários dispositivos, conhecidos como seguidores solares [5].

O desenvolvimento de um sistema rastreador necessita de considerações em relação à variação da radiação, que é diretamente relacionada a posição geográfica. Mas o princípio básico de um seguidor solar é permitir que o ângulo de incidência dos raios solares seja sempre perpendicular ao plano do módulo. Isso permite um melhor aproveitamento da energia solar incidente [6] [7].

O ponto a ser analisado é a localização do sol durante o dia. Ela pode ser descrita em termos da altitude β e o ângulo azimutal ϕ_s , como apresentado na Fig. 1 [8]. O azimute é o ângulo da projeção do sol com o norte, enquanto a altitude solar é o ângulo que o sol faz com o plano horizontal.

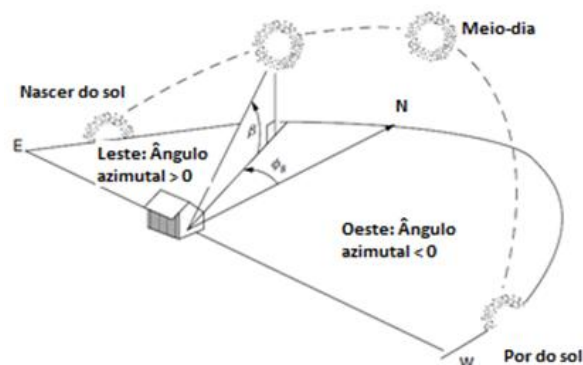


Fig. 1. A posição do sol pode ser descrita pelo o ângulo de altitude β e o seu ângulo azimutal ϕ_s [8].

Durante a manhã o ângulo do azimute é positivo, quando o sol se encontra no leste, e negativo durante as tardes, quando o sol se encontra no oeste, estes ângulos são importantes para a construção do seguidor solar e para o software que foi construído com objetivo prever algumas características do sol durante um dia qualquer.

Na Fig. 2 é apresentado um estudo comparativo sobre o ganho de captação de radiação solar para painéis fixos e móveis em um e dois eixos, em todos os casos este ganho foi positivo [9].

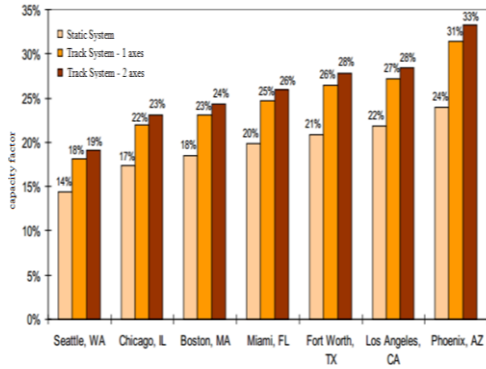


Fig. 2. Fator de capacidade de irradiação solar captada por sistemas estáticos e seguidores solares [8].

II. METODOLOGIA

A. EQUAÇÕES

Os painéis fotovoltaicos produzem energia com a presença de radiação solar. Assim é importante saber em que horas o sol nasce e a que horas ele se põe em um determinado dia, para a determinação das condições iniciais e finais do seguidor solar. As condições iniciais são conhecidas, [8], e descritas através das equações:

$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left(\frac{360}{365} (n - 81) \right) \quad (1)$$

$$H_{SR} = \cos^{-1}(-\tan(L) * \tan(\delta)) \quad (2)$$

$$H_{nascente} = 12 - \frac{H_{SR}}{15} \quad (3)$$

$$H_{poente} = 12 + \frac{H_{SR}}{15} \quad (4)$$

onde:

δ é o ângulo de declinação solar;
 L é a latitude local;
 n o número do dia no ano;
 H_{SR} uma variável auxiliar;
 $H_{nascente}$ horário do nascer do sol;
 H_{poente} horário do pôr do sol.

As equações de máxima radiação solar teórica podem ser calculadas para três sistemas: estático, um eixo e dois eixos.

A.1. SISTEMAS ESTÁTICOS

Os sistemas estáticos é o tipo de montagem mais simples, além de ser mais barata, pois não exige sistemas eletrônicos para movimentar o painel. Em contrapartida é menos eficiente na captação da radiação solar quando comparada com os outros sistemas existentes. Suas equações teóricas de captação máxima de radiação solar são dada por (5) à (17):

$$I_b = A \cdot e^{-k \cdot m} \quad (5)$$

$$m = \frac{1}{\text{sen}(\beta)} \quad (6)$$

$$A = 1160 + 75 * \text{sen} \left(\left(\frac{360}{365} \right) (n - 275) \right) \quad (7)$$

$$k = 0.174 + 0.035 * \text{sen} \left(\left(\frac{360}{365} \right) (n - 100) \right) \quad (8)$$

Onde:

A é a insolação extraterrestre aparente;
 k é a profundidade ótica da atmosfera;
 I_b é a insolação incidente sobre a superfície extraterrestre;
 β o ângulo de altitude solar.

$$\Omega = \text{sen}(\beta) * \cos(\epsilon) \quad (9)$$

$$\theta = \cos^{-1}(\cos(\beta) * \cos(\phi_s - \phi_c) * \text{sen}(\epsilon) + \Omega) \quad (10)$$

$$I_{bc} = I_b * \cos(\theta) \quad (11)$$

$$C = 0.095 + 0.04 * \text{sen} \left(\left(\frac{360}{365} \right) (n - 100) \right) \quad (12)$$

$$I_{dh} = C * I_b \quad (13)$$

$$I_{bh} = I_b * \text{sen}(\beta) \quad (14)$$

$$I_{dc} = I_{dh} \left(\frac{1 + \cos(\epsilon)}{2} \right) \quad (15)$$

$$I_{rc} = \rho * I_b * (\text{sen}(\beta) + C) \left(\frac{1 - \cos(\epsilon)}{2} \right) \quad (16)$$

$$I_c = I_{bc} + I_{dc} + I_{rc} \quad (17)$$

onde:

Ω é uma variável auxiliar;
 ϵ é o ângulo de inclinação do coletor;
 θ é o ângulo de incidência;
 Φ_c é o ângulo azimutal do coletor;
 I_{bc} é a insolação incidente diretamente sobre o coletor;
 C é o fator de difusão do céu;
 I_{dh} é a componente difusa de insolação sobre uma superfície horizontal;
 I_{bh} é a componente direta incidente sobre uma superfície horizontal;
 I_{rc} e I_{dc} , representam, insolação difusa na atmosfera e insolação refletida pelo solo, respectivamente;
 ρ é a refletância do solo;
 I_c é a irradiação solar sobre o coletor.

A.2. SEGUIDOR SOLAR DE UM EIXO

Para sistemas movidos em um eixo, como o desenvolvido neste trabalho, as equações teóricas de captação máxima de radiação solar são simplificadas por (18) à (21).

$$I_{bc} = I_b \cos(\delta) \quad (18)$$

$$I_{dc} = C I_b \left(\frac{1 + \cos(90 - \beta + \delta)}{2} \right) \quad (19)$$

$$I_{rc} = \rho(I_{bh} + I_{dh}) \left(\frac{1 - \cos(90 - \beta + \delta)}{2} \right) \quad (20)$$

$$I_c = I_{bc} + I_{dc} + I_{rc} \quad (21)$$

A.3. SEGUIDOR SOLAR MOVIDO EM DOIS EIXOS

Sistemas que utilizam dois eixos as equações também são simplificadas, elas são apresentadas de (22) à (25). Não foram realizados testes práticos para essa situação, mas a mesma foi inserida no aplicativo computacional desenvolvido, para realização de comparações.

$$I_{bc} = I_b \quad (22)$$

$$I_{dc} = C * I_b * \left(\frac{1 + \cos(90 - \beta)}{2} \right) \quad (23)$$

$$I_{rc} = \rho * (I_{bh} + I_{dh}) * \left(\frac{1 - \cos(90 - \beta)}{2} \right) \quad (24)$$

$$I_c = I_{bc} + I_{dc} + I_{rc} \quad (25)$$

B. SISTEMA DE MONITORAMENTO

Para prever algumas características da irradiação solar em um determinado dia foi desenvolvido um aplicativo computacional que utiliza as equações de (1) a (25), baseado no dia e na localização geográfica, conforme Fig. 3.

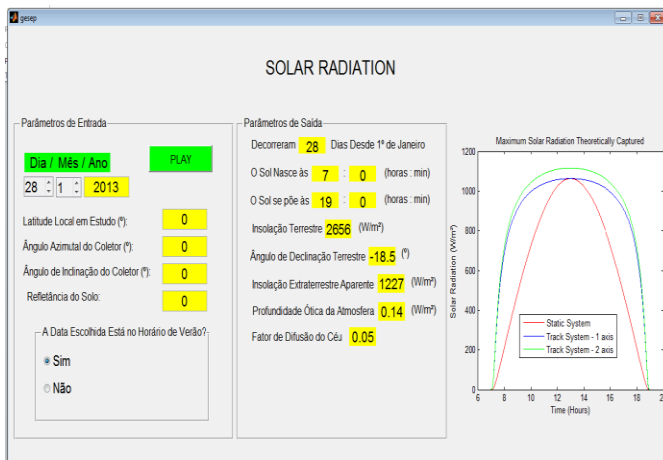


Fig. 3. Interface gráfica do aplicativo desenvolvido.

Neste aplicativo os dados são apresentados entre o horário do nascer do sol e o pôr do sol, conforme as equações (3) e (4). Após calcular a hora inicial, são realizados incrementos de 36 segundos até que hora atinja o valor em que o sol se põe.

Além do aplicativo desenvolvido para cálculo das condições ideais de radiação, também foi desenvolvido um aplicativo para monitoramento em tempo real da potência gerada. Neste aplicativo exibido na Fig. 4 são monitorados dois painéis, um com seguidor solar e outro estático.

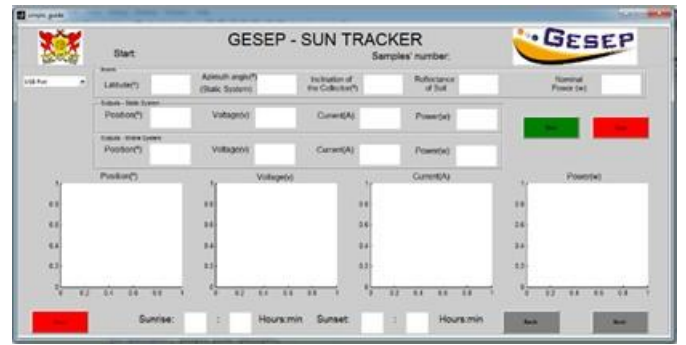


Fig. 4. Interface Gráfica do aplicativo de monitoramento.

C. PROTÓTIPO

O protótipo foi construído fundamentado em baixo custo e na simplicidade. Ele é movido por um eixo e permite o ajuste manual da inclinação. A base é de ferro, adicionado a um rolamento para reduzir a força do motor necessária para mover a estrutura. O restante da estrutura é feita de alumínio, leve e capaz de suportar o painel solar. A Fig. 5 exibe a estrutura desenvolvida.



Fig. 5. Estrutura mecânica com motor de acionamento.

D. ACIONAMENTO E ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O sistema de controle usa um PIC 16F877 para armazenar todas as informações e comandos. Um circuito integrado (CI) ULN2004 foi usado para drenar a corrente necessária para o funcionamento do motor, além de utilizar um *display* LCD. Cada bobina do motor de passo tem duas conexões. A primeira está ligada a 12V e a outra para na saída do CI. A resistência de cada bobina é de 36 ohms e o ângulo de fase é de 15 graus.

Existe um botão para definir os minutos e outro para definir as horas. Quando ajustado, o relógio funciona normalmente e é mostrado em uma tela de LCD 16x2.



Fig. 6. Circuito de controle: Relógio e botões de ajustes



Fig. 7. Circuito de controle: Acesso de comunicação com o SPIDER 8

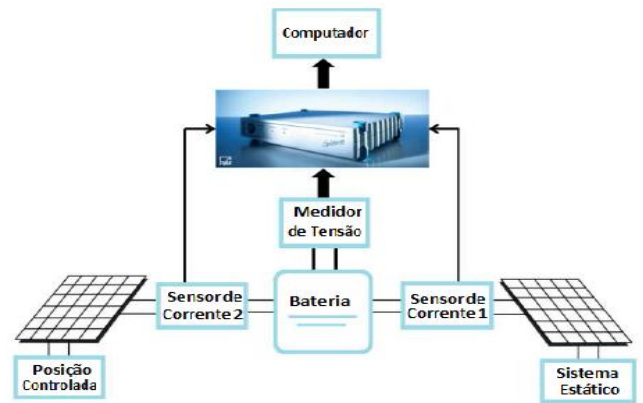


Fig. 8. Aquisição de dados com o SPIDER 8.

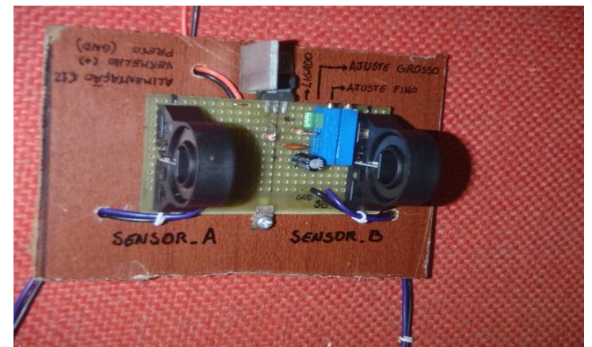


Fig. 9. Sensor de Corrente.

Após o ajuste do relógio o algoritmo toma a decisão de acordo com a hora do dia. A posição inicial é 7 horas e a posição final são 18 horas. As decisões são feitas da seguinte maneira:

1 - Se o sistema for iniciado entre 7 e 18 horas o programa calcula o quanto o motor deve agir. Se ser 7 horas, a estrutura permanece na sua posição original, caso contrário vai para a posição correspondente ao tempo do dia. Em seguida, o painel começa a seguir o sol em movimentos de 15 ° a cada hora.

2 - Às 06h10min o microcontrolador envia um comando para o motor para retornar o painel para a posição de partida.

3 - Se o relógio não está configurado no intervalo de tempo entre 7 e 18 horas o painel permanece na posição inicial até às oito horas quando ele se move pela primeira vez.

E. AQUISIÇÃO DE DADOS E MONTAGEM

A Fig. 8 mostra o sistema de aquisição (SPIDER 8) utilizado. Ele mede a corrente e a tensão no experimento. O SPIDER 8 é um sistema de medição eletrônico para computadores e é destinado para medição elétrica das variáveis mecânicas, tais como tensão, potência, pressão, aceleração e temperatura. O equipamento possui oito canais analógicos para aquisição de dados, uma porta de impressora, um soquete com 25 pinos (8 entradas digitais e 8 entradas / saídas digitais).

Para medir a corrente gerada pelo painel solar, foi utilizado um sensor de efeito Hall CSLA1CF, Fig. 9.

F. CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Para analisar o protótipo construído foi utilizado dois painéis, 5 watts cada, com parâmetros apresentados na Tabela 1. Antes de iniciar a coleta de dados, o painel fixo foi definido como inclinação de 25 ° para o norte geográfico e o outro foi colocado no protótipo com a mesma inclinação, a latitude é de -20,75 °.

Os dados para a comparação entre o painel fixo e o sistema de rastreamento foram coletados nos dias 20, 21 e 22 de agosto de 2012, na cidade de Viçosa - MG, quando é inverno no Brasil, e as condições climáticas dos dias medidos são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO PAINEL

Kyocera Multicrystal Photovoltaic Module - KS5	
Potência Máxima	5 W
Tensão de Potência Máxima	16.9 V
Corrente de Potência Máxima	0.29 A
Tensão de Circuito Aberto	21.5 V
Corrente de Circuito Aberto	0.31 A

Tabela 2 - CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Dia	Temperatura	Tempo
20/08/2012	24°C	Parcialmente nublado
21/08/2012	21°C	Nublado
22/08/2012	25°C	Ensolarado

III. RESULTADOS

Primeiramente foi simulado no aplicativo desenvolvido a variação da máxima radiação teórica capturada pelos painéis no dia 20/08/12. Na simulação foi utilizado o valor de refletância do solo igual a 0,1. Os resultados são exibidos na Fig. 10, e a radiação máxima para esse dia foi de 1000 W/m^2 .

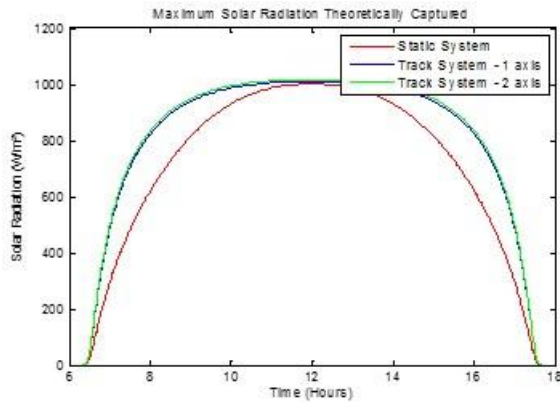


Fig. 10. Máxima radiação teoricamente capturada (20/08/2012).

Os valores medidos de corrente e potência para o dia 20/08/2012 são apresentados nas Fig. 11 e Fig. 12, respectivamente.

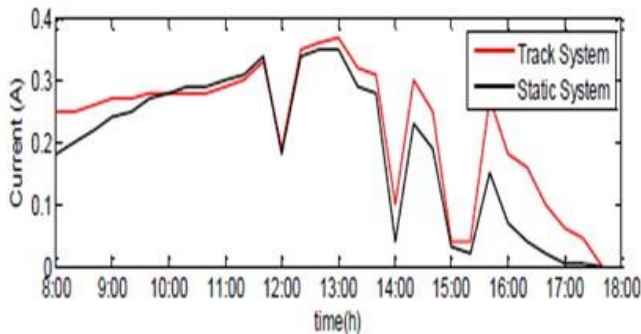


Fig. 11. Corrente no dia 20/08/2012

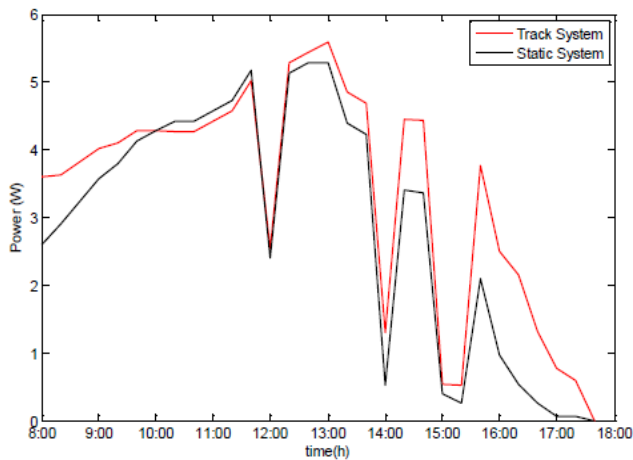


Fig. 12. Potências no dia 20/08/2012.

Para um dia nublado, como foi 21/08/2012 o sistema proposto apresentou rendimento semelhante ao sistema estático,

conforme Fig. 13 e Fig. 14. Em dias nublados a radiação direta é reduzida significativamente, eliminando assim a principal vantagem de um seguidor solar.

Os dados coletados para o dia 22/08/2012 são apresentados nas Fig. 16 e Fig. 17. Este foi o dia com menor presença de nuvens, proporcionando ao seguidor solar capturar maior potência tanto no período da manhã, quanto no período da tarde.

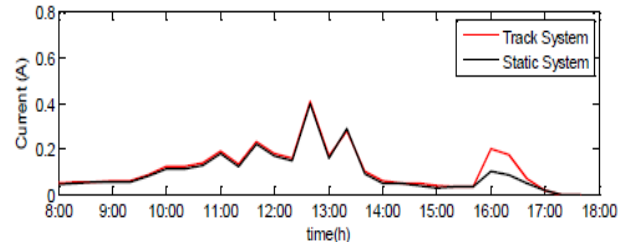


Fig. 13. Corrente no dia 21/08/2012.

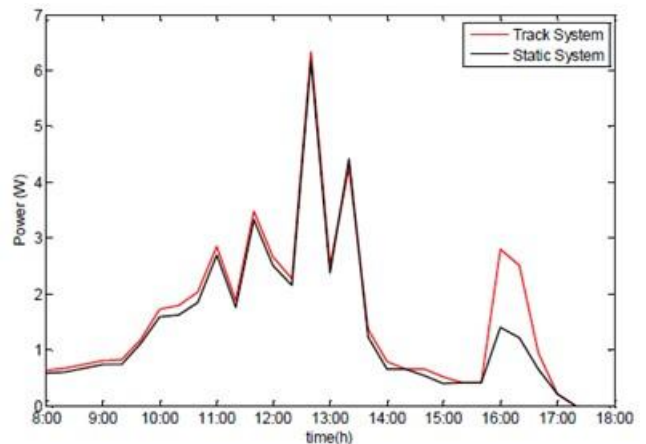


Fig. 14. Potências geradas no dia 21/08/2012.

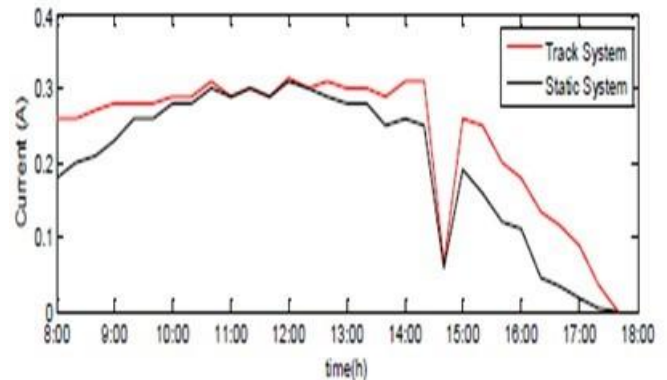


Fig. 15. Corrente no dia 22/08/2012

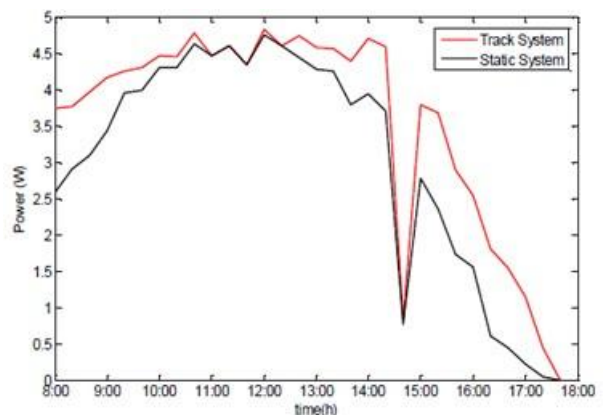


Fig. 16. Potências geradas no dia 22/08/2012.

Na Tabela 3 são exibidos os resultados das potências médias por dia. Mesmo em um dia nublado o sistema de rastreamento mostrou um aumento de potência em relação ao modelo fixo. O melhor rendimento foi obtido no terceiro dia, próximo a 18%.

As duas últimas linhas da Tabela 3 apresentam as diferenças para os modelos quando comparamos o valor medido e o previsto na simulação, lembrando que na simulação conseguimos produzir 5w para um valor de radiação igual a 1000 w/m², sendo que para outros valores obtemos um valor proporcional.

Tabela 3 - Média Das Potências Durante o Dia

		20/08/12	21/08/12	22/08/12
Produzido (W)	Sistema estático	2.88	1.42	3.03
	Seguidor solar	3.36	1.60	3.57
Teórico (W)	Sistema estático	3.62	3.57	3.49
	Seguidor solar	4.12	4,02	3.87
Diferença (W)	Sistema estático	0.74	2.15	0.46
	Seguidor solar	0.76	0.55	0.3

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um seguidor solar de baixo custo movido em um eixo. O protótipo mostrou-se eficaz em dia com baixa nebulosidade. Em um dia ensolarado o aumento de potência foi de aproximadamente de 18%.

O protótipo construído pode ser usado em diferentes tipos de ambientes e aplicações, principalmente por causa da sua robustez. Também é possível aumentar as suas dimensões para ser usado em outros painéis solares de diferentes tamanhos.

V. AGRADECIMENTOS

Este trabalho está sendo desenvolvido com auxílio financeiro das agências de fomento FAPEMIG, CAPES e CNPQ.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] E. Díaz-Dorado, A. Suárez-García, C. Carrillo e J. Cidrás, "Influence of the PV modules layout in the power losses of a PV array with shadows," em *Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition*, 2010.
- [2] D. Nguyen e B. Lehman, "A Reconfigurable Solar Photovoltaic Array Under Shadow Conditions," em *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008.
- [3] . S. Z. KARAZHANOV, "Temperature and doping level dependence of solar cell performance including excitons,"

Solar Energy and Materials & Solar Cells, vol. 63, nº 2, pp. 149-163, 2000.

- [4] H. Dong, W. Zhi-Chao, S. Huan, X. Gui-Li e L. Fang-Pei, "Research and design on a robust sun-tracker," em *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, 2009.
- [5] S. Armstrong e W. Hurley, "Investigating the Effectiveness of Maximum Power Point Tracking for a Solar System," em *Power Electronics Specialists Conference*, 2005.
- [6] J.-S. Ko , J.-S. Choi , . S.-J. Kang , M.-G. Jang , J.-W. Back , . D.-K. Kim e D.-H. Chung, "A novel tracking system development of photovoltaic for low radiation," em *Telecommunications Energy Conference*, 2009.
- [7] M. NEVES, C. C. RODRIGUES e F. M. EMANUEL, "Módulo fotovoltaico com seguimento da posição solar," Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- [8] G. M. MASTERS, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, 2004.
- [9] NREL, "National Renewable Energy Laboratory," [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/>.

BIOGRAFIAS



Adriano da Silva Antônio nasceu na cidade de Viçosa-MG/Brasil. Ingressou no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa – UFV no ano de 2008, afastando-se nos anos de 2011/2012 para se aperfeiçoar pelo *Institut National Polytechnique de Lorraine – INPL*, retornando para a UFV onde está finalizando seus estudos, faz trabalhos na área de energia solar e atua como presidente do GESEP da mesma instituição.



Gabriel Akira Gomes Ribeiro nasceu em Araçuaí, no Brasil, em 1989. Ingressou no curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil, em 2007. Estagiou na empresa de cimento Lafarge (Brasil) trabalhando com a manutenção elétrica, em 2012. Foi integrante do GESEP, onde desenvolveu trabalhos sobre soluções para sistemas de energia solar. Seus interesses de pesquisa incluíram a energia solar fotovoltaica, a legislação solar e qualidade de energia.



Heverton Augusto Pereira graduou-se em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Viçosa, em 2007, mestrado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Campinas, em 2009, e atualmente é aluno de doutorado na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil. Desde 2009 é professor do departamento de engenharia elétrica da UFV. Seus interesses incluem energia eólica e energia solar fotovoltaica.