

# PROTÓTIPO DE SEGUIDOR SOLAR DE EIXO HORIZONTAL PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

**Maurício Andres Rodriguez** – mauricio.cas@usp.br

**Marcelo Pinho Almeida** – marcelopa@iee.usp.br

**Aimé Fleury de Carvalho Pinto Neto** – afpinto@iee.usp.br

**Roberto Zilles** – zilles@iee.usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente, Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos

**José Francisco Resende da Silva** – jose.resende@elektro.com.br

ELEKTRO

**Resumo.** Este trabalho apresenta um protótipo de seguidor solar de eixo horizontal para módulos planos com um gerador fotovoltaico de 2,4 kWp. O protótipo foi construído com peças encontradas no mercado nacional e seu uso é indicado para locais com baixa latitude, como no interior do Nordeste brasileiro. O desenvolvimento do protótipo está inserido em um projeto de P&D, cujo objetivo consiste em estudar sistemas fotovoltaicos com seguimento e concentração no contexto brasileiro.

**Palavras-chave:** Seguidor solar, Sistema Fotovoltaico

## 1. INTRODUÇÃO

Durante o projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede, deve-se optar por seguir ou não o Sol, ou seja, utilizar uma estrutura de suporte dos módulos fixa ou com rastreamento do movimento aparente do Sol. A geração fotovoltaica mundial é realizada predominantemente com módulos planos, de silício cristalino ou de filmes finos, montados em estruturas fixas. Estruturas com seguimento do Sol são utilizadas com o objetivo de aumentar a produtividade e, por isso, são assunto de estudos há mais de 35 anos (Mosher e Boese, 1977).

Para decidir sobre o uso de seguidores solares, deve-se levar em consideração o local de instalação, o recurso solar disponível e o custo e a disponibilidade dos equipamentos. Dentre os critérios de elegibilidade para a utilização do seguidor solar no Brasil, os mais críticos são o custo e a disponibilidade dos equipamentos em virtude da falta de fornecedores locais e da necessidade de importação.

Nesse sentido, o projeto “Seguidores solares para sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Sistemas com e sem concentração”, nº ANEEL PD-0385-0031/2010, engloba, dentre outras coisas, um estudo sobre o tema da utilização de seguidores solares no Brasil, em especial no Oeste do estado de São Paulo, e o desenvolvimento de um protótipo com peças e controle nacionais. O projeto é executado pelo Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo e foi proposto à ANEEL pela distribuidora ELEKTRO, que também o financia com seus recursos de P&D (Viana et al., 2012).

O protótipo construído, apresentado na Fig. 1, pode ser replicado pela indústria brasileira, amenizando a falta desse tipo de produto no mercado nacional e criando uma opção para as tradicionais estruturas fixas de suporte dos módulos fotovoltaicos. O protótipo possui uma estrutura bastante simples em aço galvanizado e o acionamento não possui componentes de difícil acesso no mercado nacional.



Figura 1 - Protótipo de seguidor solar desenvolvido no escopo do projeto “Seguidores solares para sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Sistemas com e sem concentração”.

## 2. APRESENTAÇÃO DO PROJETO

O Brasil apresenta regiões com alta incidência de radiação direta normal, nas quais o total anual pode chegar a valores superiores aos de irradiação global ou total (em uma superfície fixa com inclinação igual à latitude). Apesar do potencial do recurso solar e do crescimento do número de instalações no mundo, não existem disponíveis, no Brasil, instalações que utilizem concentração solar para aplicação fotovoltaica com células multijunção, de modo a possibilitar a avaliação operacional e de geração comparativamente com outras tecnologias, como a de módulos planos fixos e a de módulos planos com seguimento do Sol.

O projeto “Seguidores solares para sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Sistemas com e sem concentração” está baseado em cinco metas, que são: avaliar a tecnologia de concentradores para sistemas fotovoltaicos, montar e instalar um sistema fotovoltaico de alta concentração, construir um seguidor solar para módulos planos, desenvolver mecanismo de rastreamento e realizar o projeto de engenharia de uma usina fotovoltaica de 1 MWp.

As atividades iniciais, para atender à primeira meta, consistiram em avaliar a tecnologia de concentradores para sistemas fotovoltaicos para verificar a aplicabilidade dessa tecnologia em área de concessão da ELEKTRO, identificando localidade com potencial solar e com possibilidade de ganho na geração de energia. A escolha do local se baseou, inicialmente, na observação do mapa de irradiação direta normal, apresentado na Fig. 2 (Viana et al., 2011).

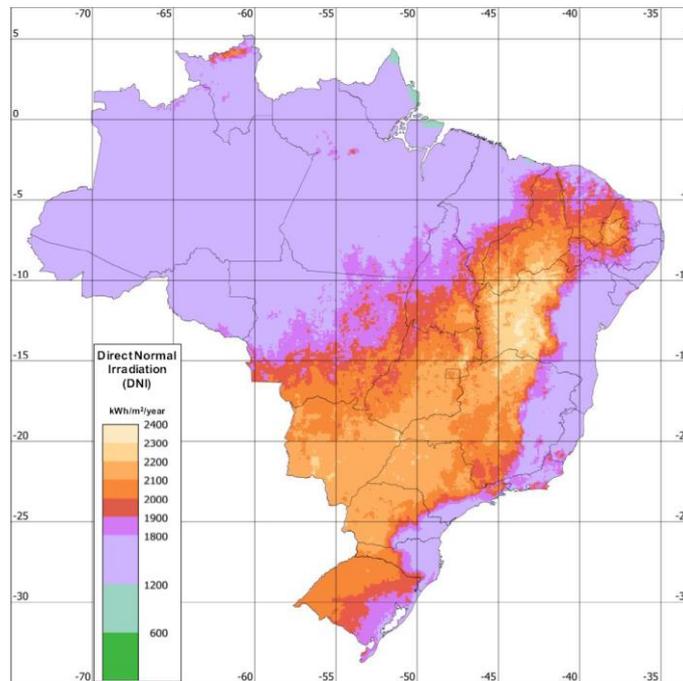


Figura 2 - Mapa brasileiro de irradiação direta normal.

Conforme se observa na Fig. 2, a região oeste do estado de São Paulo apresenta valores elevados de irradiação direta normal, que variam na faixa de 2.100 a 2.300 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Nessa região encontra-se o município de Ilha Solteira, que pertence à área de concessão da ELEKTRO. A Fig. 3 mostra uma ampliação da região de Ilha Solteira.

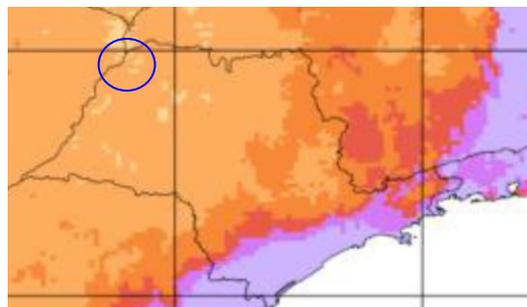


Figura 3 - Ampliação da região de Ilha Solteira (assinalada pelo círculo azul).

Realizou-se o levantamento dos valores de irradiação direta normal em vários pontos próximos ao município de Ilha Solteira, com base nos dados do Projeto SWERA (SWERA, 2008), que são indicados na Fig. 4 junto às respectivas coordenadas geográficas. A Tab. 1 mostra as coordenadas dos pontos A a L, assinalados na Fig. 4, e os respectivos valores de irradiação direta normal.



Figura 4 - Pontos com disponibilidade de dados solarimétricos próximos a Ilha Solteira e suas respectivas coordenadas geográficas (Viana et al., 2012).

Tabela 1 - Coordenadas geográficas dos pontos A a L, assinalados no mapa da Fig. 4, e respectivos valores de irradiação direta normal (Viana et al., 2012).

Irradiação Direta Normal - $H_{DIRN}$													Média anual	Total anual		
LAT	LONG	PONTO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	kWh/m <sup>2</sup> /dia	kWh/m <sup>2</sup> /ano
-20,34	-51,46	A	4,9	5,9	6,5	5,2	6,0	5,4	5,9	6,6	6,7	5,6	6,2	6,3	5,92	2162
-20,33	-51,36	B	5,0	5,9	6,7	5,3	6,1	5,4	5,8	6,4	6,3	5,6	6,2	6,3	5,93	2163
-20,33	-51,27	C	5,0	6,0	6,6	5,2	6,2	5,4	5,7	6,5	6,5	5,7	6,2	6,3	5,94	2167
-20,33	-51,17	D	5,0	6,0	6,5	5,0	6,0	5,4	6,0	6,8	6,5	5,7	6,3	6,3	5,94	2167
-20,43	-51,46	E	5,1	5,8	6,7	5,2	6,0	5,7	5,8	6,7	6,4	5,6	6,2	6,4	5,97	2181
-20,42	-51,36	F	5,0	6,0	6,7	5,4	6,0	5,6	5,9	6,6	6,5	5,7	6,3	6,5	6,01	2192
-20,42	-51,27	G	5,1	6,1	6,7	5,4	6,2	5,3	5,7	6,6	6,3	5,6	6,4	6,4	5,97	2180
-20,42	-51,17	H	5,0	6,0	6,7	5,2	5,9	5,4	5,8	6,7	6,5	5,7	6,4	6,5	5,98	2182
-20,52	-51,46	I	5,0	5,8	6,7	5,3	6,1	5,3	5,7	6,5	5,6	5,6	6,2	6,3	5,84	2131
-20,51	-51,36	J	5,0	6,0	6,7	5,4	6,1	5,2	5,7	6,5	6,5	5,6	6,2	6,3	5,94	2166
-20,51	-51,26	K	5,0	6,0	6,7	5,4	5,9	5,3	5,8	6,6	6,5	5,7	6,4	6,5	5,98	2182
-20,51	-51,17	L	5,1	6,0	6,5	5,2	6,0	5,3	5,7	6,7	6,5	5,7	6,4	6,5	5,97	2180

A segunda meta, relacionada à instalação de sistemas fotovoltaicos de alta concentração com seguimento e equipamento de monitoramento, foi concluída em outubro de 2013. O local de instalação escolhido (Fig. 5) foi o campus III da UNESP (Universidade Estadual Paulista), onde há acesso à rede elétrica de distribuição para realizar a conexão dos sistemas fotovoltaicos, segurança patrimonial para todos os materiais instalados, facilidade de conexão à internet e equipe local capaz de acompanhar o funcionamento dos sistemas.



Figura 5 - Local escolhido para instalar os sistemas fotovoltaicos e o equipamento de monitoramento do recurso solar (estação solarimétrica).

O equipamento para o monitoramento do recurso solar é uma estação solarimétrica composta por dois piranômetros, pireliômetro, rastreador, esfera de sombreamento para um dos piranômetros, termômetro, higrômetro, anemômetro, sensor de direção do vento, sistema de aquisição e transmissão de dados e alimentação através de sistema fotovoltaico autônomo. A Fig. 6 mostra a estação solarimétrica instalada.



Figura 6 - Estação solarimétrica.

Foram instalados dois sistemas fotovoltaicos com seguidor solar de dois eixos do fabricante BSQ Solar, modelo BSQ-D280/53CPV Sun Tracker. Em um dos seguidores foram utilizados módulos com concentração do fabricante DAIDO, modelo DACPV-280W25 (de 280 Wp) e, no outro, módulos convencionais do fabricante ILB HELIOS, modelo LIG180W6P (de 180 Wp). O sistema com concentração possui 13,44 kWp, enquanto que o com módulos planos possui 7,2 kWp ocupando aproximadamente a mesma área. Os diagramas dos sistemas são apresentados na Fig. 7. A Fig. 8 mostra os sistemas fotovoltaicos instalados no campus III da UNESP. A partir dos dados elétricos obtidos dos sistemas fotovoltaicos e dos de recurso solar será possível analisar seus desempenhos de forma comparativa.

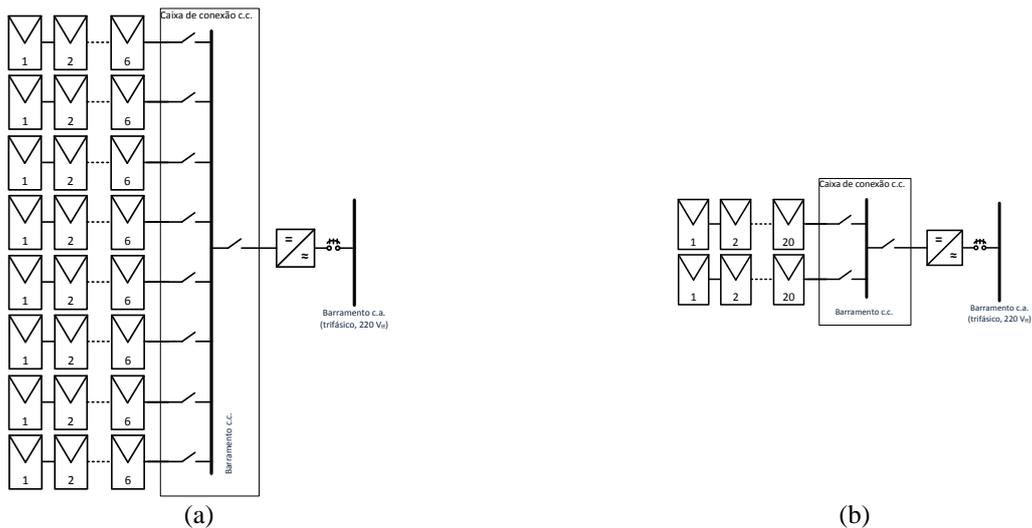


Figura 7 - Diagramas unifilares do sistema (a) com concentração e (b) com módulos planos.



Figura 8 - Seguidores instalados no campus III da UNESP, com sistema com concentração à esquerda e com módulos planos à direita.

### 3. O PROTÓTIPO

A terceira e quarta metas do projeto envolvem a construção de um seguidor solar e de seu mecanismo de rastreamento. Essa atividade está sendo desenvolvida no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, e tem como objetivo montar um protótipo em escala reduzida, com um gerador fotovoltaico de 2,4 kWp.

O primeiro passo no desenvolvimento do protótipo foi escolher o tipo de seguidor. Visando a simplicidade mecânica e facilidade de construção, optou-se por um seguidor de um eixo horizontal. Esse tipo de seguidor pode ser utilizado em locais com baixa latitude, como, por exemplo, o interior do Nordeste brasileiro, onde há uma incidência solar elevada, inclusive de radiação direta normal. Dessa forma, o seguidor desenvolvido seria uma opção de baixo custo e fácil manutenção para sistemas fotovoltaicos conectados à rede (em especial centrais solares) instalados nesta região.

A estrutura básica do protótipo consiste em um eixo de 5 m de comprimento e 10 cm de diâmetro apoiado nas extremidades em perfis em A, e o acoplamento é feito com rolamentos que facilitam a rotação. O suporte dos módulos é realizado por seis longarinas com 3,265 m de comprimento (esse valor corresponde a duas vezes o comprimento do módulo que se pretende instalar no seguidor) fixadas no eixo central. Toda essa estrutura foi construída com peças de aço, posteriormente galvanizadas a fogo, de forma a ser resistente às intempéries. A Fig. 9 mostra um desenho da estrutura construída e suas dimensões.

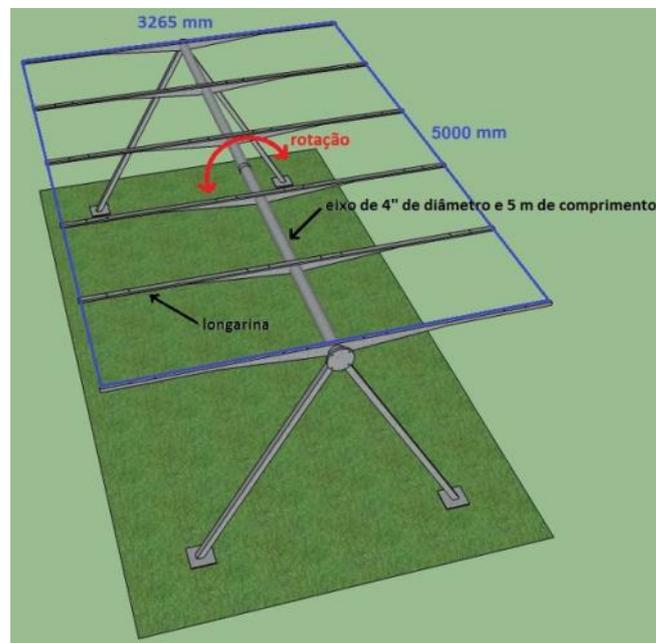


Figura 9 - Desenho da estrutura metálica do protótipo do seguidor solar.

A fixação no solo foi feita com quatro pequenas bases de concreto de 50x50 cm de superfície. A altura das bases foi ajustada de modo a nivelar o plano de instalação do seguidor, haja vista que o terreno não é plano. A Fig. 10 mostra detalhe de uma base de fixação e de um pé do perfil em A.



Figura 10 - Base de concreto para fixação no solo.

A Fig. 11 mostra uma visão da estrutura já construída e instalada no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo.



Figura 11 - Estrutura metálica do protótipo do seguidor solar.

A superfície formada pelas longarinas tem uma liberdade de movimento em torno de seu eixo de  $120^\circ$ , sendo  $60^\circ$  para o Leste (início do dia) e  $60^\circ$  para o Oeste (fim do dia), como mostra a Fig. 12. A rotação de Leste para Oeste ao longo do dia, considerando o tipo de controle utilizado, é realizada em passos de aproximadamente  $0,5^\circ$  a cada 2 minutos e, ao atingir os  $60^\circ$  para o Oeste, a superfície retorna para a posição inicial com uma rotação contínua de  $120^\circ$ .

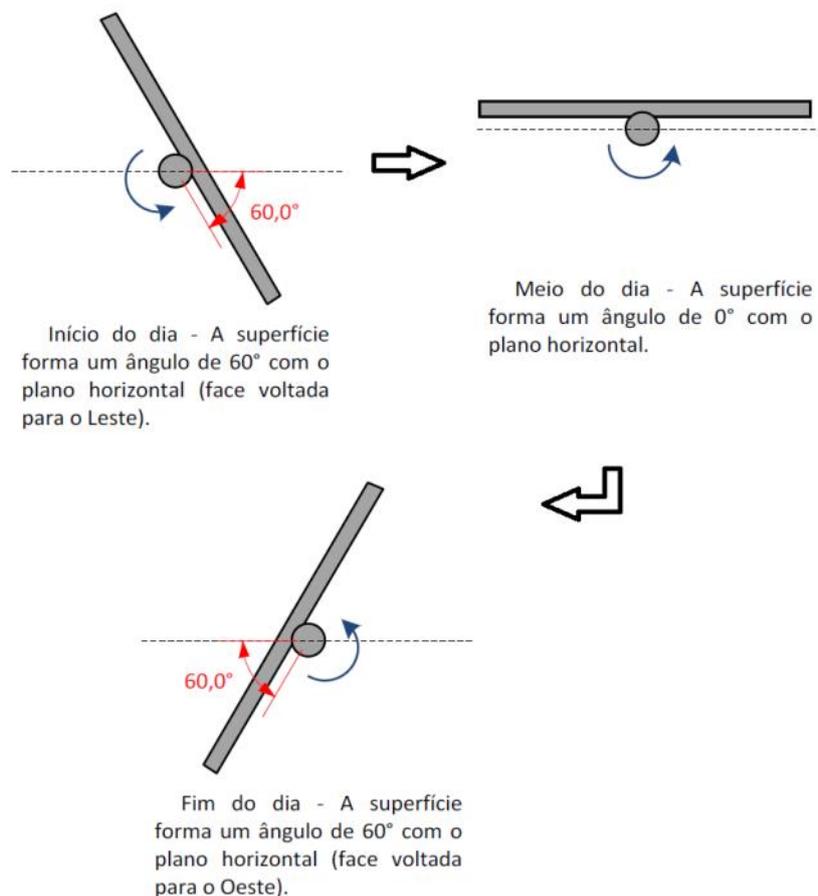


Figura 12 - Movimento diário da superfície móvel (onde serão fixados os módulos) do protótipo do seguidor solar.

Nos momentos em que a superfície não estiver em movimento, o eixo permanecerá travado devido à própria inércia do sistema, evitando rotações indevidas provocadas pelo torque da própria superfície ou pela força do vento. Esses dois fatores combinados provocam um torque de aproximadamente 1.500 Nm, considerando uma velocidade de vento máxima de 20 m/s.

O cálculo do torque máximo foi realizado em duas etapas: primeiro se calculou o torque provocado pelo peso da superfície, com a Eq. (1), e a esse valor foi somado o torque da força do vento, obtido com a Eq. (2) (Butuc et al., 2011). A Fig. 13 mostra o diagrama esquemático do protótipo do seguidor indicando as dimensões utilizadas nas equações.

$$T_{\text{peso}} = M g b \cos \alpha \quad (1)$$

$$T_{\text{vento}} = 0,5 \rho_{\text{ar}} v^2 C_p S a \quad (2)$$

onde  $M$  é a massa das longarinas e dos módulos (aproximadamente 340 kg);  $g$  é a aceleração da gravidade (aproximadamente  $10 \text{ m/s}^2$ );  $a$ ,  $b$  e  $\alpha$  são dimensões identificadas na Fig. 13 (sendo  $a = 0,18 \text{ m}$ ,  $b = 0,1 \text{ m}$  e  $\alpha = 60^\circ$ );  $\rho_{\text{ar}}$  é a densidade do ar ( $1,225 \text{ kg/m}^3$ );  $v$  é a velocidade do vento máxima ( $20 \text{ m/s}$ );  $C_p$  é o coeficiente de pressão ( $1,6$ ); e  $S$  é a área da superfície móvel (aproximadamente  $16,1 \text{ m}^2$ ).

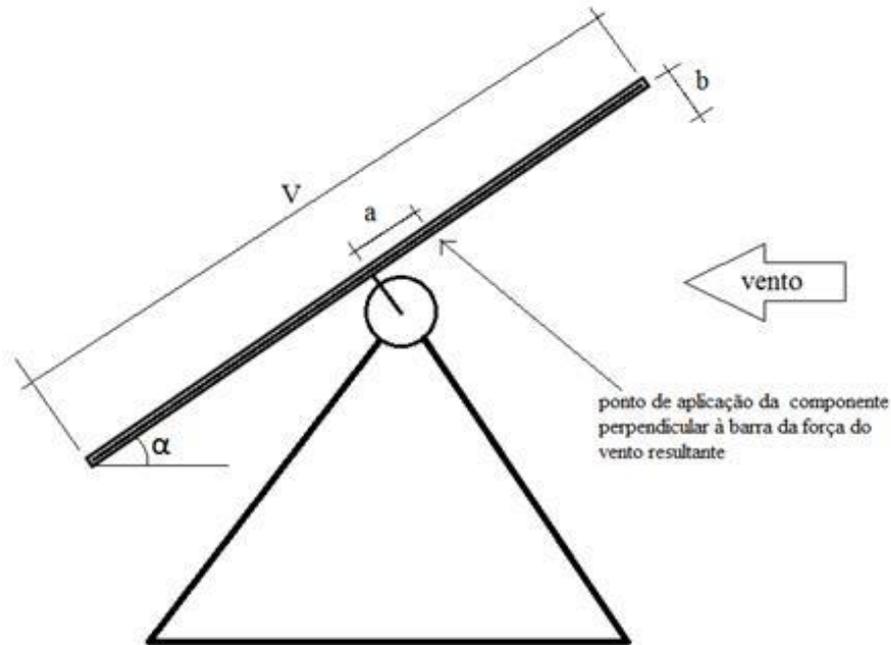


Figura 13 - Diagrama esquemático do protótipo do seguidor solar.

Outra característica importante é o momento de inércia do conjunto superfície móvel e eixo. Para obtê-lo, considerou-se que o eixo é um cilindro de paredes finas e a superfície móvel uma placa fina homogênea. A Eq. (3) foi utilizada para calcular o momento de inércia total, igual a  $302,15 \text{ kg.m}^2$ .

$$I = \frac{1}{2} m_{\text{eixo}} r_{\text{eixo}}^2 + \frac{1}{12} m_{\text{longarinas}} V^2 \quad (3)$$

onde  $m_{\text{eixo}}$  é a massa do eixo (aproximadamente 45 kg),  $r_{\text{eixo}}$  é o raio do eixo (5 cm),  $m_{\text{longarinas}}$  é a massa das longarinas (aproximadamente 150 kg) e  $V$  é o comprimento das longarinas (3,265 m).

O acionamento do eixo é feito com um motor de passo, modelo CTP32, com torque máximo de 7 N.m e momento de inércia de  $0,000261 \text{ kg.m}^2$ . Como o torque necessário para mover a superfície girante é relativamente elevado e o momento de inércia do motor é demasiadamente pequeno para movimentar o eixo (a relação entre o momento de inércia da carga – eixo e longarinas – e o do motor é de mais de um milhão, enquanto que o valor recomendado deve ser inferior a 5), fez-se necessário utilizar uma caixa de redução. O momento de inércia da carga visto pelo motor, neste caso, segue a relação dada pela Eq. (4).

$$I_{\text{vm}} = I i^{-2} \quad (4)$$

onde  $I_{\text{vm}}$  é o momento de inércia da carga visto pelo motor e  $i$  é a relação de redução. Utilizou-se, então, uma caixa de redução com  $i = 500$ , da empresa WEG-Cestari, resultando em uma relação entre momentos de inércia de 4,67. Em relação ao torque, os 7 N.m máximos do motor serão vistos pela carga quinhentas vezes maior, valor mais do que suficiente para acionar o eixo.

A Fig. 14 apresenta o esquema de conexão entre o eixo do seguidor e o eixo de saída da caixa de redução e o eixo de entrada da caixa de redução e o eixo do motor de passo.

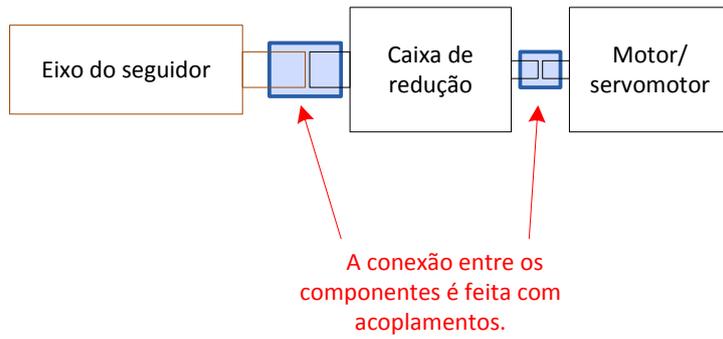


Figura 14 - Esquema da conexão entre o eixo do seguidor, a caixa de redução e o motor de passo.

O controle do protótipo é composto por um sensor óptico, duas chaves de fim de curso e um driver programável para o motor de passo. O sensor óptico e as chaves de fim de curso enviam sinais digitais para o driver, que, por sua vez, controla o motor de passo seguindo um programa pré-configurado. A Fig. 15 mostra o fluxo de sinais no sistema de controle.

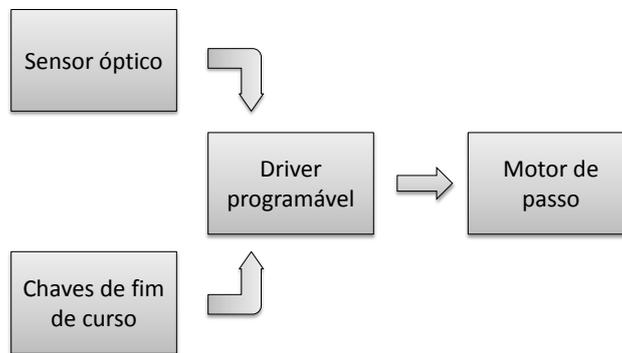


Figura 15 - Fluxo de sinais no sistema de controle do protótipo de seguidor.

O sensor óptico utilizado é o FUSIONSEEKER DS-50S6 (Fig. 16). Este dispositivo possui dois sensores de luz localizados em cada lado de sua caixa. Quando o sensor está posicionado de frente para o Sol, isto é, quando os dois sensores recebem a mesma quantidade de luz, cada um produz um sinal de saída de 24 Vcc. No entanto, quando o sensor não está totalmente de frente para o Sol, o sensor que recebe menos luz produz um sinal de 0 Vcc. O driver é o ST10-Si. O fabricante disponibiliza um software com o qual é possível estabelecer os parâmetros do motor (como a corrente, a resolução do passo e a velocidade) e escrever programas complexos para controlar o movimento do motor de passo e sua interação com os demais sensores. A Fig. 16 também mostra o driver utilizado.



(a)



(b)

Figura 16 - Sensor óptico (a) e driver (b) utilizados.

O sensor óptico possui duas saídas ligadas ao driver, onde 24 Vcc é considerado nível lógico alto (1) e 0 Vcc nível lógico baixo (0). O driver foi programado para executar as ações descritas na Tab. 2.

Tabela 2 - Ordens executadas pelo driver em função das saídas do sensor óptico.

Input 1	Input 2	Movimento do motor
1	1	Parado
0	1	Rotação horária
1	0	Rotação anti-horária

Assim, quando o sensor óptico está completamente virado para o Sol, o seguidor fica parado até que uma mudança da posição aparente do Sol faça o driver comandar o giro do motor para encontrar um novo estado de equilíbrio. Ao fim do dia, uma das longarinas ativa uma chave de fim de curso que provoca o movimento de retorno. O seguidor permanece parado até o amanhecer do outro dia. Uma vez que os sensores de luz detectam os raios do Sol, o movimento é retomado. No futuro, o controle será modificado para o tipo microcontrolado, possibilitando maior flexibilidade nos comandos e mais precisão.

#### 4. MEDIÇÕES

Após alguns testes preliminares de juste, o protótipo do seguidor foi posto em operação durante um dia. Para comprovar a eficiência do sistema de seguimento, foram realizadas medições de irradiância durante esse dia de operação em dois planos distintos: um fixo, com inclinação de 23° e orientado para o Norte, e outro igual à superfície móvel do seguidor, que permanece voltada para o Sol ao longo do dia.

Em cada um dos planos foi instalado um módulo de referência calibrado, como mostra a Fig. 17.



Figura 17 - Localização dos módulos de referência: 1 – plano móvel e 2 – plano fixo.

Os valores medidos estão no gráfico da Fig. 18. É evidente que o plano móvel recebeu uma quantidade maior de irradiância, principalmente no início e no final do dia, como era esperado.

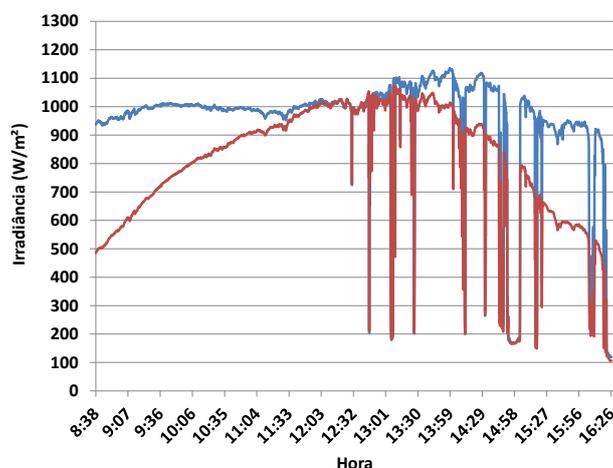


Figura 18 - Perfis de irradiância com (curva azul) e sem (curva vermelha) seguimento.

A energia acumulada nos dois planos foram 6,16 kWh/m<sup>2</sup> para o plano fixo e 7,39 kWh/m<sup>2</sup> para o plano móvel, sendo possível observar um ganho de quase 20%.

Pesquisas adicionais, como a medição do autoconsumo do sistema de seguimento e controle, a comparação com outros tipos de controle e a medição do desempenho do sistema fotovoltaico de 2,4 kWp para cada caso, ainda serão realizadas no decorrer do projeto.

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o projeto e o desenvolvimento de um protótipo de seguidor solar de eixo N-S horizontal, atividade relacionada ao Projeto “Seguidores solares para sistemas fotovoltaicos conectados à rede: Sistemas com e sem concentração”, nº ANEEL PD-0385-0031/2010. O protótipo foi construído somente com peças disponíveis no mercado nacional, e mostra o potencial técnico para construir esse tipo de equipamento no país sem a necessidade de importar estruturas, peças e até mesmo tecnologia de produtos já consolidados no mercado externo.

### *Agradecimentos*

Agradecemos à empresa WEG-CESTARI pela doação da caixa de redução utilizada no protótipo do seguidor.

## REFERÊNCIAS

- Butuc B., Moldovean G., Velicu R., 2011. Wind and weight induced loads on a gear based azimuthal photovoltaic platform, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Las Palmas de Gran Canaria.
- Mosher D. M., Boese R. E., 1977. The advantages of Sun tracking for planar silicon solar cells, Solar Energy, vol. 19, pp. 91-07.
- SWERA. 2008. Solar and Wind Energy Resource Assessment. Disponível em: <<http://swera.unep.net/>>. Acesso: novembro de 2008.
- Viana, T. S., Ruther, R., et al., 2011. Assessing the potential of concentrating solar photovoltaic generation in Brazil with satellite-derived direct normal irradiation. Solar Energy, vol. 85, pp. 486-495.
- Viana T. S., Pinto, A., Almeida, M. P., Zilles, R., 2012. Projeto “Seguidores solares para sistemas fotovoltaicos conectados à rede: sistemas com e sem concentração”, IV Congresso Brasileiro de Energia Solar, São Paulo.

## PROTOTYPE OF HORIZONTAL SINGLE AXIS SOLAR TRACKER FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

**Abstract.** *This paper describes the prototype of a solar tracker for standard modules with a 2.4 kWp PV generator. The prototype was built with parts found in domestic market and it is suitable for being used at low latitude sites, such as the northeastern Brazil. The development of the prototype is inserted in the context of a R&D project intended to study CPV and conventional PV systems with tracking in Brazil.*

**Key words:** *Solar Tracker, Photovoltaic System*