

# DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO CONCENTRADOR ESTÁTICO HELIUS 33X PARA SISTEMAS AUTÔNOMOS

**Tiago Cassol Severo** – tsevero@panamerican.com.br

Pan American School of Porto Alegre

**Izete Zanesco** – izete@puhrs.br

**Adriano Moehlecke** – moehleck@puhrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Física

Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais

**Resumo.** A redução no custo da energia elétrica produzida em sistemas autônomos é possível pelo uso de concentradores estáticos e células solares bifaciais. Neste sentido, o objetivo é apresentar o desenvolvimento teórico e experimental do módulo fotovoltaico concentrador estático HELIUS 33X com células solares bifaciais destinado a sistemas isolados da rede elétrica. O concentrador foi desenvolvido a partir de um método de desenho de sistemas ópticos lineares, por meio da óptica não formadora de imagens. A partir da análise da irradiação solar horária média mensal e da irradiação solar diária média mensal foi determinado o comportamento do HELIUS 33X ajustando os fatores de concentração horários e considerando as perdas ópticas. A partir da seleção de oito direções de raios solares incidentes projetados sobre o meridiano local, o método de traçado de raios, da lei da reflexão e dos fatores de concentração ajustados foi desenvolvido o sistema óptico do módulo concentrador HELIUS 33X. Constatou-se que o dispositivo desenvolvido possibilita uma produção de 106 % a mais de energia quando comparado a um módulo convencional com a mesma área de células solares. Um protótipo experimental foi desenvolvido para comparar os valores simulados e experimentais do módulo concentrador HELIUS 33X.

**Palavras-chaves:** Concentrador Estático, Sistemas Autônomos, Células Bifaciais.

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

As regiões rurais do território brasileiro possuem um número significativo de pessoas sem acesso a energia elétrica. Esta realidade não é exclusividade das regiões norte e nordeste brasileiro. Em estados considerados mais desenvolvidos, como por exemplo São Paulo e Rio Grande do Sul, um percentual da população rural não tem acesso a energia elétrica (Copetti, Macagnan e Zanesco, 1995). Neste cenário e tendo em vista a alta incidência de radiação solar e a baixa densidade populacional brasileira no meio rural, a energia solar fotovoltaica torna-se competitiva para atender as regiões isoladas, contribuindo para suprir a atual demanda energética do meio rural.

A principal razão que dificulta a sua maior disseminação é o alto custo inicial da instalação do sistema fotovoltaico (Kazmerski, 2002). Uma das linhas de pesquisa na área de energia solar fotovoltaica está focada no desenvolvimento de concentradores estáticos de radiação solar que, associados às células solares bifaciais (ativas em ambas as faces), podem proporcionar reduções significativas no custo final (Miñano, 1988 e Zanesco, 1996).

A integração de um sistema óptico concentrador de radiação solar às células solares visa a diminuição da área destas (Tripanagnostopoulos *et al.*, 2005), produzindo uma redução no custo do módulo fotovoltaico, pois o valor do dispositivo é superior ao do sistema óptico.

Os módulos fotovoltaicos concentradores estáticos são projetados para serem instalados da mesma forma que um módulo convencional, isto é, sem sistemas mecânicos para seguimento do movimento aparente do Sol (Febras *et al.*, 2009, Zanesco e Lorenzo, 2002 e Carlsson *et al.*, 2005), facilitando a instalação em sistemas fotovoltaicos autônomos em regiões isoladas. Este tipo de módulo fotovoltaico também pode ser instalado em fachadas de edificações (Zanesco *et al.*, 2006 e Zacharopoulos *et al.*, 2000) e ser projetado com refletor colorido para facilitar a integração (Moehlecke *et al.*, 2001).

Os módulos concentradores com seguimento do movimento aparente do Sol (Slade e Garboushian, 2007, Gombert *et al.*, 2009) podem ser projetados para o seguimento em um eixo (Klotz e Mohring, 2007) ou dois eixos (Antonini *et al.*, 2009 e Rumyantsev *et al.*, 2002). Atualmente há vários sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica (Martínez *et al.*, 2008, Pietruszko e Gradzki, 2004) e autônomos (Urbano *et al.*, 2003) com módulos fotovoltaicos com concentração da radiação solar. Projeções de custos (Muhál e Bruton, 2009) demonstraram que o valor de 1,56 euros por  $W_p$  pode ser atingido para o ano de 2015, com o uso de sistemas de concentração.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento e a caracterização do módulo fotovoltaico concentrador estático HELIUS 33X otimizado para a cidade de Porto Alegre-RS. O HELIUS 33X foi projetado para células solares bifaciais e se destina a sistemas isolados da rede elétrica.

## 2. O MÓDULO FOTOVOLTAICO CONCENTRADOR ESTÁTICO HELIUS 33X

Alguns parâmetros foram definidos previamente para o desenvolvimento do módulo concentrador estático HELIUS 33X. Este módulo concentrador foi projetado para a integração em sistemas fotovoltaicos autônomos, na cidade de Porto Alegre-RS. Portanto, o fator de concentração deve ser maior nos meses correspondentes ao inverno em relação ao verão, com a finalidade de compensar a variação natural da radiação solar. Considerou-se que a energia elétrica produzida é aproximadamente uniforme ao longo do ano, para que se ajuste às necessidades energéticas de usuários de sistemas fotovoltaicos autônomos.

As células solares bifaciais estão no plano da abertura de entrada, encapsuladas com vidro de alta transparência que cobre toda a abertura de entrada do módulo concentrador. Assim, a superfície do módulo é equivalente a de um módulo convencional evitando o acúmulo de pó e a degradação do material refletor.

A utilização de células solares bifaciais resulta em uma significativa redução no custo do Watt-pico produzido. Como são ativas em ambas as faces, com uma única lâmina de silício é possível produzir até o dobro de energia elétrica, quando acopladas a um sistema óptico adequado. Além do mais, a temperatura de uma célula solar bifacial associada a um concentrador solar estático é similar à temperatura de uma célula solar monofacial em um módulo convencional, evitando maiores perdas de eficiência devido ao aumento de temperatura (Zanescio, 1996).

O sistema óptico é linear, baseado na reflexão especular e sem uso de material refringente, mantendo o concentrador o mais leve possível, facilitando seu transporte, e evitando o aquecimento das células solares.

Determinou-se que o ângulo de inclinação do módulo concentrador é de  $48^\circ$ , sendo este o melhor ângulo de inclinação para módulos convencionais que constituem um sistema fotovoltaico autônomo em Porto Alegre (Zanescio *et al.* 2004). Este ângulo de inclinação possibilita uma resposta com a menor diferença entre a energia produzida no inverno e no verão.

### 2.1 Método de traçado de raios

A metodologia utilizada para desenhar a seção transversal do concentrador solar e estimar a resposta do módulo para determinada posição do Sol foi desenvolvida por Severo (2005) e baseia-se no traçado de raios (Benitez, 1998 e Winston, 1989). A partir do princípio dos raios extremos da óptica não formadora de imagem (anidólica), este mecanismo permite desenhar concentradores solares em duas dimensões (2D) que coletam os raios dentro de uma abertura angular e desprezam todos os outros raios fora desse intervalo.

### 2.2 Dados para implementação do traçado de raios

Por se tratar de um módulo fotovoltaico concentrador, é importante realizar a análise a partir de dados horários de irradiação solar. Portanto, para a determinação dos fatores de concentração do módulo concentrador para que a resposta seja aproximadamente constante ao longo do ano, foram estimados os valores médios da irradiação horária incidente em uma superfície inclinada com um ângulo de  $48^\circ$  em Porto Alegre para cada mês do ano.

A partir da irradiação diária média mensal sobre um plano horizontal, catalogada na base de dados *International H-World* e do cálculo da irradiação extraterrestre horizontal diária média mensal, foi possível determinar os índices de transparência  $K_t$  diários médios mensais. Com estes valores e através do método de Aguiar, gerou-se uma série de índices de transparência diários para dez anos. Determinou-se a irradiação horária direta e a difusa que incide no plano inclinado, calculando-se a média para cada hora e mês (Zanescio, 1996).

Para exemplificar, na Fig.1-(a) comparam-se os resultados para o mês em que ocorre o solstício de inverno e de verão. Observa-se que no inverno a irradiação é menor durante todas as horas do dia. A irradiação diária média mensal, apresentada na Fig.1-(b), foi obtida a partir da soma da irradiação horária. Nota-se que, no inverno, os valores da irradiação são inferiores àqueles correspondentes aos meses de verão. Assim, foi determinado que no inverno o fator de concentração deve ser em média 25 % maior que no verão.

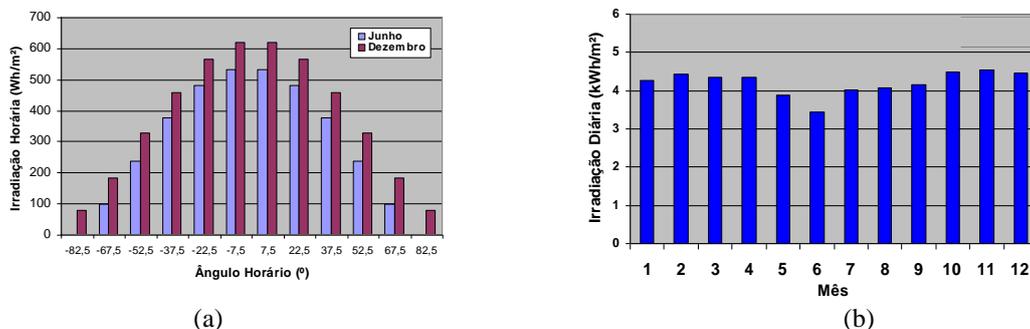


Figura 1- (a) Irradiação horária média mensal incidente em uma superfície inclinada de  $48^\circ$ , em Porto Alegre, para o mês de junho e para o mês de dezembro, (b) irradiação diária média mensal incidente em uma superfície inclinada de  $48^\circ$ , em Porto Alegre.

### 2.3 Fatores de concentração

Utilizando uma planilha de cálculo e a irradiação horária média mensal incidente na face frontal, foram ajustados os fatores de concentração horários e determinada a irradiação horária incidente na face posterior. Comparando os valores diários médios mensais e lembrando que no inverno é necessário concentrar 25 % a mais de radiação solar que no verão, foram reajustados os fatores de concentração horários até obter uma resposta do módulo aproximadamente constante durante o ano.

O processo é iterativo até encontrar os fatores de concentração necessários, ou seja, estabelecer em que horário devem ocorrer as maiores ou menores concentrações. Neste caso, consideraram-se as perdas ópticas na interface ar/vidro e vidro/ar e a refletância da superfície interna do sistema óptico, sendo esta igual a 0,96.

### 2.4 Aplicação do método de traçado de raios para o módulo HELIUS 33X

Para desenvolver a seção transversal do sistema óptico do módulo concentrador HELIUS 33X, considerou-se uma abertura angular  $\phi$  igual a  $91^\circ$ . Desta forma, a irradiância começa a ser concentrada sobre a face posterior das células solares às 9 horas no inverno e aproximadamente às 8 horas no verão. Cabe destacar que ao meio-dia (horário solar) no verão, quando o ângulo dos raios solares com a direção do zênite é menor, também ocorre concentração da radiação solar.

Estabeleceu-se que os maiores fatores de concentração devem ocorrer próximos ao meio-dia solar nos meses de inverno, ou seja, quando a irradiância incide quase perpendicularmente na superfície do módulo. Por outro lado, neste horário, nos meses correspondentes ao verão, a concentração deve ser menos efetiva para que a resposta do módulo concentrador seja similar nos meses de inverno e de verão.

Para o desenho da seção transversal do HELIUS 33X foram selecionadas oito posições de raios solares incidentes de entrada, projetados sobre o meridiano local, dentro da abertura de entrada e com intervalo corresponde a aproximadamente uma hora, conforme mostra a Fig. 2.

Os raios incidentes de entrada numerados de 1 a 4 possuem um intervalo de  $15^\circ$  cada um e iniciam às 9 horas do inverno (aproximadamente, 8 horas no verão) com o raio número 1, sendo que o segundo raio corresponde às 10 horas do inverno, o terceiro raio às 11 horas e o quarto raio ao meio dia solar no solstício de inverno (aproximadamente, 10 horas e 30 minutos no verão). Os raios de entrada numerados de 5 a 8 estão divididos em intervalos de  $11,5^\circ$  cada um, sendo que o raio número 8 equivale ao meio-dia solar no solstício de verão.

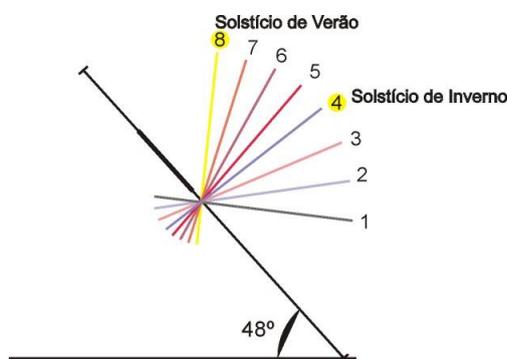


Figura 2- Posição dos oito raios solares incidentes de entrada, projetados sobre o meridiano local.

### 2.5 Desenvolvimento da seção transversal do módulo HELIUS 33X

Para a determinação da seção transversal do concentrador estático HELIUS 33X, utilizou-se o programa computacional *CorelDRAW* para desenhar a abertura de entrada, o receptor, os raios incidentes de entrada e refletidos, formando, deste forma, o sistema óptico.

Considerando o fato que as células solares comerciais podem ser quase-quadradas com 10 cm de lado, estabeleceu-se para o desenvolvimento do sistema óptico que o tamanho do receptor do HELIUS 33X será igual ao tamanho destas células.

Em relação ao trabalho de Severo, Zanesco e Moehlecke (2007), após a análise do módulo HELIUS 31Y, verificou-se a possibilidade de aumentar o fator de concentração. Assim, no módulo HELIUS 33X foram implementados melhores ajustes nos fatores de concentração em relação à irradiação incidente.

A abertura de entrada do concentrador possui um comprimento igual a 40 cm e, apresentando uma concentração geométrica ( $C_g$ ) igual a 4. A maior abertura de entrada aumenta a concentração dos raios solares, principalmente, na parte da manhã e da tarde nos meses de inverno, correspondendo aos raios incidentes de entrada de 1 a 4. Desta forma, é possível alcançar uma melhor distribuição de energia produzida durante o ano.

O desenho da seção transversal do sistema óptico do módulo HELIUS 33X partiu do raio incidente de entrada número 4, que equivale ao solstício de inverno. Os raios solares deveriam sofrer um fator de concentração igual a 2, o

que significa que 50 % dos raios incidentes da abertura de entrada, ou seja, 20 cm, devem chegar à face posterior das células solares. Este fato pode ser visualizado na Fig. 3.

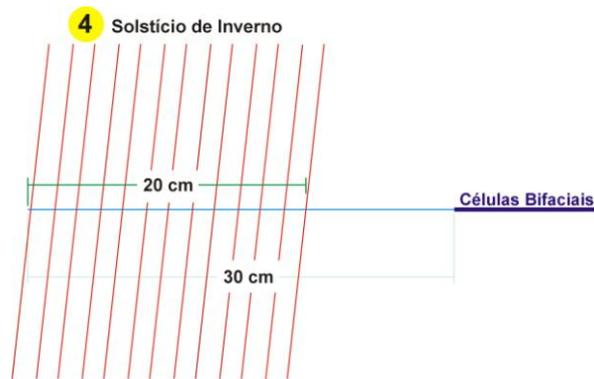


Figura 3- Feixe de raios paralelos que incidem na abertura de entrada do concentrador e devem chegar na face posterior das células solares.

Em resumo, o raio de incidência de entrada número 4 foi duplicado várias vezes e os raios foram espaçados entre si em 0,5 cm até preencher 20 cm da abertura de entrada. O próximo passo foi desenhar todos os raios que incidem na face posterior da célula solar. Esses raios são denominados de raios incidentes refletidos e devem sair da face posterior da célula solar bifacial e encontrar o raio incidente de entrada formando a primeira intersecção com o raio número 4, conforme mostra o ponto “A” da Fig. 4.

Os raios incidentes refletidos são desenhados como se estivessem saindo das células solares, sendo que estão afastados 0,5° entre si. Na intersecção do primeiro raio incidente de entrada número 4 e o primeiro raio incidente refletido, inicia-se o desenho da seção transversal como mostrado na Fig. 4.

Utilizando o programa *CorelDRAW* é possível medir o ângulo formado entre o raio incidente de entrada e o raio incidente refletido. Este ângulo  $\xi$  formado entre ambos os raios é inserido em uma planilha de cálculo que fornece o ângulo de rotação do elemento da superfície refletora, possibilitando que o raio incidente de entrada seja refletido sobre a face posterior das células solares.

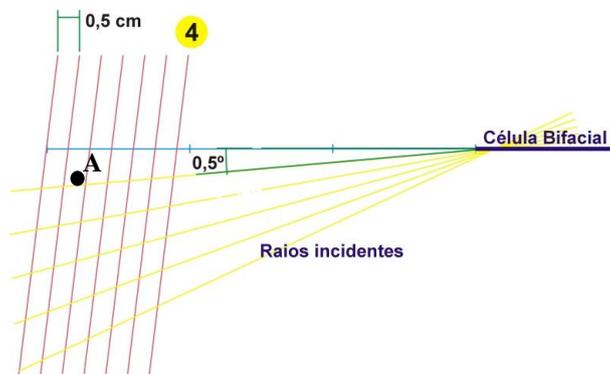


Figura 4- Esquema representando o feixe de raios incidentes de entrada, correspondente ao raio número 4 e raios refletidos utilizados para desenhar o sistema óptico.

A normal ao elemento refletor é igual ao ângulo formado entre o raio incidente de entrada e o raio incidente refletido ( $\xi$ ) dividido por dois. Lembrando que a normal é perpendicular à superfície refletora, então, para posicionar o elemento refletor especular basta rotacioná-lo de 90° em relação a normal formada. Portanto, o ângulo do elemento refletor ( $\zeta$ ) é dado na Eq. (1).

$$\zeta = \frac{\xi}{2} + 90^\circ \quad (1)$$

Após calcular o ângulo do elemento refletor  $\zeta$ , desenhou-se o elemento refletor com a orientação necessária, conforme ilustra a Fig. 5-(a). O tamanho do elemento refletor inicia-se no ponto onde ocorre a intersecção entre o raio incidente de entrada e o raio incidente refletido até o ponto em que o raio incidente de entrada seguinte atinge a superfície. Este processo é repetido para encontrar os elementos refletores  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ , até alcançar o fator de concentração desejado, que para o raio 4 é igual a 2. Esse procedimento está representado na Fig. 5-(b).

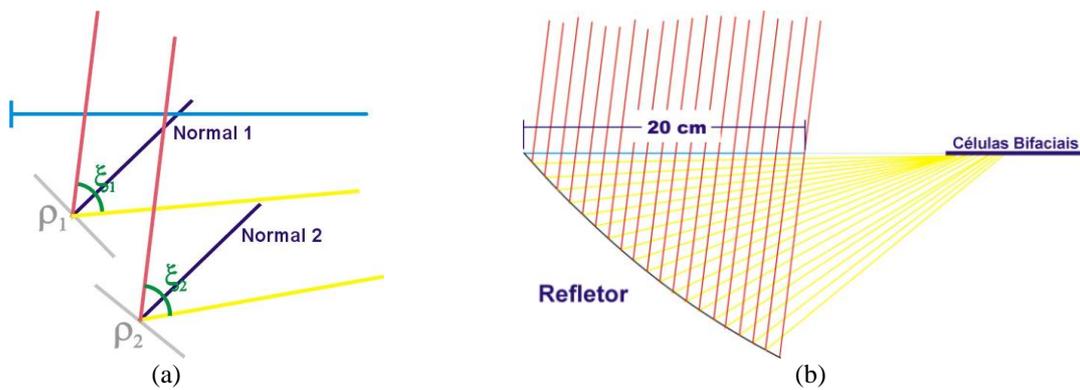


Figura 5- (a) Representação dos passos para desenhar os elementos da superfície refletora e (b) esquema representativo do método de traçado de raios desenvolvido e desenho para a seção transversal do módulo concentrador HELIUS 33X.

Durante o desenho dos refletores foi importante executar ajustes para obter uma superfície contínua. Na Fig. 4 observa-se que os raios incidentes refletidos parecem sair de um único ponto das células solares. No entanto na Fig. 5-(b) não se observa este fato porque o posicionamento dos elementos refletores resulta no deslocamento dos raios incidentes refletidos um pouco mais para a direita, distribuindo-os na superfície da célula solar.

Na Fig. 6 mostra-se o resultado encontrado, bem como os raios incidentes de entrada utilizados e os correspondentes raios de entrada utilizados para desenhar cada região do concentrador.

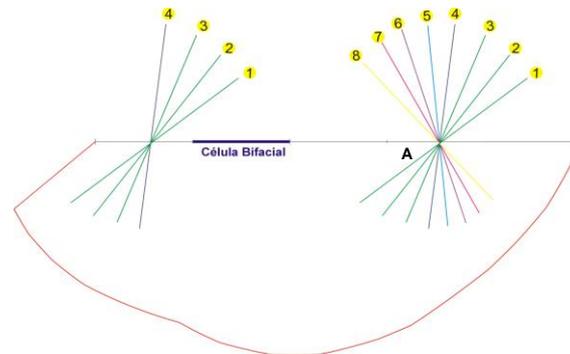


Figura 6- Seção transversal do módulo HELIUS 33X e representação dos raios incidentes de entrada.

Observa-se, na Fig. 6, que na abertura de entrada, à direita das células solares, o sistema óptico foi desenvolvido a partir dos oito raios incidentes de entrada. No entanto, na região à esquerda das células solares utilizaram-se os raios de entrada de 1 a 4, para aumentar o fator de concentração em horários específicos. O objetivo foi aumentar a energia produzida em determinadas épocas do ano e, conseqüentemente, ao longo do ano. Os raios incidentes de entrada de 5 a 8 foram concentrados à direita do ponto A, significando que foram destinados 20 cm da abertura de entrada para concentrá-los. Para os raios incidentes de entrada de 1 a 4, foi utilizada a abertura de entrada restante do lado esquerdo do ponto A, correspondente também a 20 cm.

## 2.6 Análise da resposta do módulo HELIUS 33X

Para caracterizar a performance do módulo ao longo do ano, faz-se necessário conhecer o fator de concentração (C) no intervalo de 0° a 180°. Na Fig. 7 apresenta-se o fator de concentração para o módulo HELIUS 33X. Nota-se que o fator de concentração máximo é 2 e que o intervalo do ângulo dos raios incidentes é amplo, de 40° a 132°.

A influência deste resultado na quantidade de energia solar recebida nas células solares é apresentada na Fig. 8. Nota-se que a irradiação diária média mensal em ambas as faces das células solares está bem distribuída ao longo do ano e que as maiores concentrações ocorrem nos meses de inverno.

Também se constata que, em média, 106 % a mais de energia pode ser produzida, quando o módulo HELIUS 33X é comparado com um módulo convencional.

## 3. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DO CONCENTRADOR HELIUS 33X

Um protótipo do módulo concentrador HELIUS 33X foi construído para células solares com 5 cm de largura. Em duas placas de metal, a seção transversal do módulo concentrador HELIUS 33X foi definida. Neste caso, foi

necessário acrescentar um espaçamento de aproximadamente 2,0 cm em volta do perfil do sistema óptico. Para a obtenção da seção transversal nas placas metálicas, foram utilizadas as medidas apresentadas na Fig. 9.

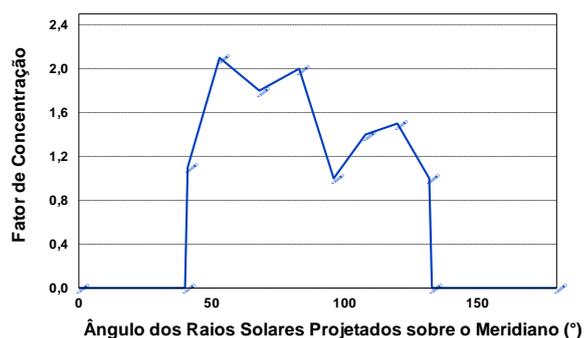


Figura 7- Fator de concentração para a radiação direta do módulo HELIUS 33X em função do ângulo dos raios incidentes projetados sobre o meridiano local ( $\psi$ ).

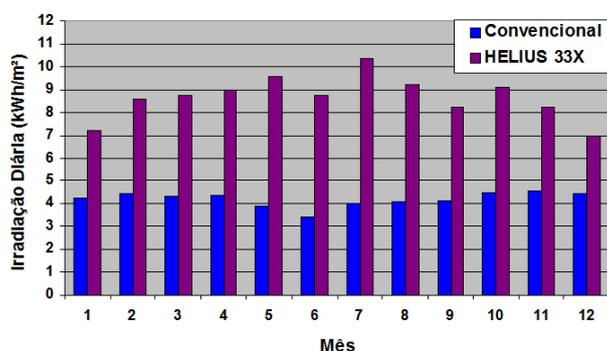


Figura 8- Irradiação diária média mensal incidente nas células solares do módulo HELIUS 33X e em um módulo convencional.

Com as seções transversais do HELIUS 33X confeccionadas, o próximo passo foi montar o suporte de sustentação para o sistema óptico do protótipo do módulo concentrador. Para isso, quatro furos foram feitos nos quatro cantos das placas metálicas. Quatro parafusos do tipo sem fim de 30 cm de comprimento foram inseridos e parafusados tanto internamente como externamente. O objetivo deste suporte foi dar sustentação ao módulo concentrador HELIUS 33X. A seguir foi cortada uma placa de aço inox com 30 cm de comprimento e com a largura igual à extensão da seção transversal, isto é, com 41 cm.

Esta placa de aço inox foi levemente dobrada em posições determinadas para que fosse possível inseri-la com facilidade no suporte do protótipo do HELIUS 33X. Essas posições estratégicas são nas dobras mais acentuadas da seção transversal.

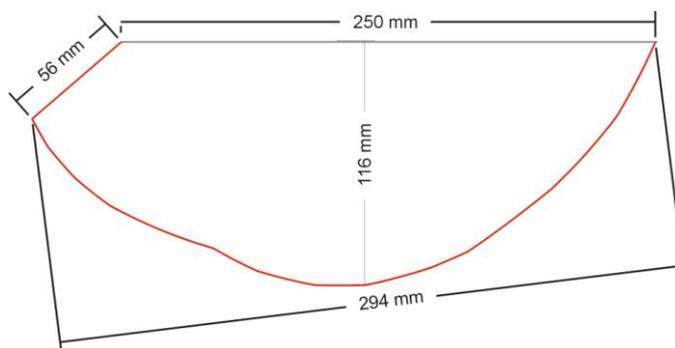


Figura 9- Medidas da seção transversal do protótipo do HELIUS 33X para células solares de 5,0 cm x 2,5 cm.

Posteriormente, a placa de aço inox foi soldada em toda a extensão da seção transversal. Após o processo de soldagem, os parafusos superiores puderam ser retirados e somente os dois parafusos inferiores foram mantidos para melhor sustentação do sistema óptico. O resultado final pode ser visto na Fig. 10.

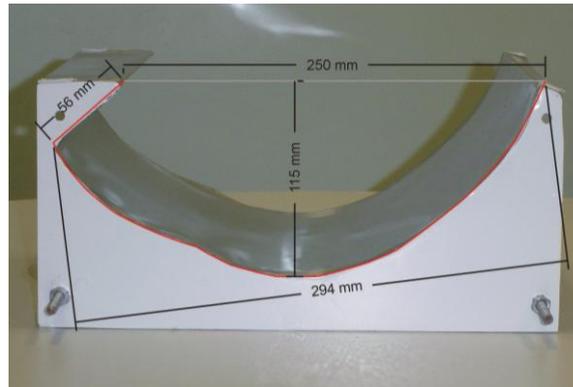


Figura 10- Sistema óptico do protótipo do módulo concentrador HELIUS 33X.

Para caracterizar o sistema óptico, foi medida a refletância do aço inox polido. O valor médio da refletância, no intervalo de 350 nm a 1200 nm, é de 0,59 para aço com polimento adicional.

Após a fabricação do sistema óptico do módulo concentrador HELIUS 33X, as células solares foram soldadas para completar o módulo concentrador. Para a análise experimental do comportamento do módulo concentrador foi necessário medir independentemente a irradiância que incide em cada face das células solares bifaciais, utilizando duas células solares monofaciais soldadas em uma placa de circuito impresso de dupla face com 25 cm de comprimento e 5,8 cm de largura.

Para fins de praticidade, somente a célula solar frontal foi protegida pelo vidro, pois um vidro sobre a face posterior das células solares bifaciais somente aumenta as perdas ópticas. Além disso, a célula posterior estará protegida devido ao acoplamento do vidro no módulo concentrador. O protótipo do módulo concentrador HELIUS 33X pode ser visualizado na Fig. 11.

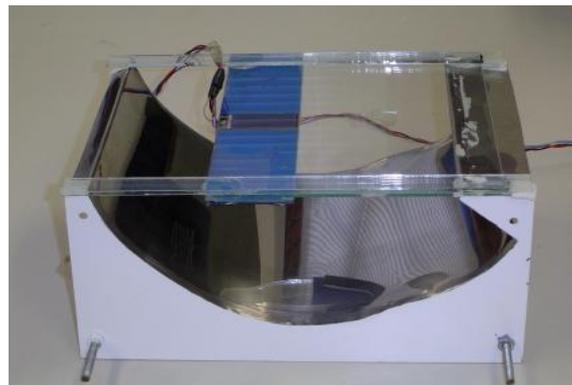


Figura 11- Protótipo do módulo concentrador HELIUS 33X.

As células solares foram associadas a resistores de  $0,25 \Omega$ , a fim de medir a diferença de potencial sobre o resistor, com valor máximo de 80 mV. Em uma análise experimental prévia, observou-se que os resistores utilizados têm a resistência praticamente inalterada pela variação de temperatura.

#### 4. CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PROTÓTIPOS

Para analisar o protótipo do módulo concentrador HELIUS 33X foi necessário calibrar as células solares utilizando um piranômetro Eppley. As células solares monofaciais encapsuladas foram calibradas durante dois dias sob céu sem nuvens, pelo período da manhã e tarde. As células solares foram posicionadas para que os raios solares incidissem perpendicularmente e os valores máximos e mínimos de irradiância solar medida foram de  $1054 \text{ W/m}^2$  e  $938 \text{ W/m}^2$ , respectivamente.

As duas células solares e o piranômetro Eppley foram conectados a um sistema de aquisição de dados, constituído de um multímetro Agilent 34970A, 6½ dígitos e um microcomputador portátil. A comunicação entre o microcomputador e o multímetro foi realizada por meio de uma interface RS-232. A cada minuto, as células solares foram viradas para que fosse possível medir a célula posicionada no lado contrário. Para cada célula solar foi calculada a constante de calibração. Para a caracterização experimental do módulo concentrador solar HELIUS 33X, as células solares foram fixadas na abertura de entrada do concentrador como pode ser visto na Fig. 11.

O HELIUS 33X foi caracterizado a partir dos raios solares projetados sobre o meridiano local, cujo ângulo medido a partir da superfície do módulo é representado por  $\psi$ . O protótipo foi colocado sobre uma superfície inclinada que possibilita o ajuste da inclinação.

Esses dados experimentais foram obtidos durante um dia com céu sem nuvens com auxílio do sistema de aquisição de dados anteriormente descrito. Além disso, a irradiância solar foi sempre superior a  $700 \text{ W/m}^2$  e foram realizadas várias medidas para cada célula solar e ângulo  $\psi$ . O ângulo  $\psi$  foi variado de  $5^\circ$  em  $5^\circ$ .

O procedimento para a realização das medidas foi repetido três vezes. Na Fig. 12 apresentam-se os resultados. Observa-se que o fator de concentração simulado é superior aos valores experimentais e apresenta um deslocamento para a direita, isto é, na direção de  $\psi$  crescente.

A primeira diferença verificada, provavelmente está associada à refletância do aço inox polido, que é 0,59. A principal causa do deslocamento do comportamento do fator de concentração em função de  $\psi$  é uma pequena diferença na forma da seção transversal do sistema óptico, a qual pode ser verificada visualmente.

Após esta análise, constata-se que é necessário ajustar o processo de fabricação do sistema óptico aplicado ao HELIUS 33X. No entanto, o resultado apresentado na Fig. 12 é válido, sendo o uso deste tipo de módulos uma alternativa para viabilizar reduções no custo da energia elétrica produzida por meio de conversão fotovoltaica.

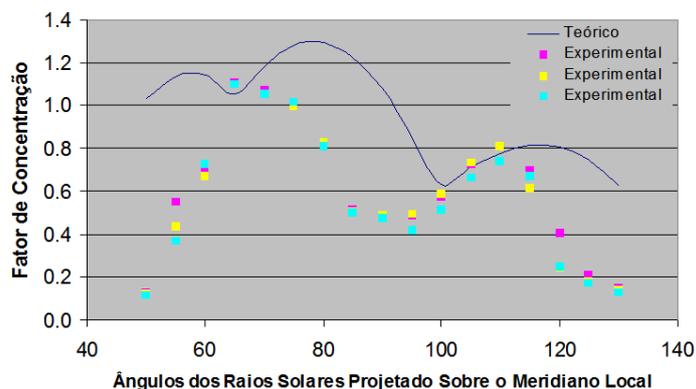


Figura 12- Comparação entre os valores do fator de concentração simulados e experimentais.

## 5. CONCLUSÕES

O objetivo foi desenvolver um novo módulo fotovoltaico concentrador estático, denominado HELIUS 33X. O módulo concentrador HELIUS 33X foi projetado com sistema óptico linear para células solares bifaciais quadradas de  $100 \text{ cm}^2$ .

A resposta do módulo concentrador desenvolvido foi comparada com a resposta de um módulo convencional, estimando a irradiância incidente em cada face das células solares bifaciais. A resposta simulada ao longo do ano é aproximadamente uniforme com um pequeno pico nos meses de inverno. O principal resultado é o aumento da energia elétrica média anual em até 106 % em relação àquela produzida por um módulo convencional, com a mesma área de células solares.

Foi construído um protótipo do módulo HELIUS 33X. A análise dos resultados experimentais do fator de concentração permitiu comparar os valores do fator de concentração simulados com os valores experimentais, comprovando a resposta ao longo do ano simulada do dispositivo. Por outro lado, a partir da caracterização experimental do módulo HELIUS 33X, constatou-se que o método utilizado para a confecção deste módulo deve ser readequado e a superfície interna do sistema óptico deve ser revestida com um material com maior refletância.

### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madri pelas medidas de refletância e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas.

## REFERÊNCIAS

Antonini, A., Butturi, M. A., Benedetto, P. Di, Milan, E., Uderzo, D., Zurru, P., Parreta, A., Baggio, N., 2009. Rondine PV Concentrators: Field Results and Innovations. 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, pp. 21-25.

- Benitez, P. G., 1998. *Conceptos Avanzados de Óptica Anidólica: Diseño y Fabricación*, Tese de Doutorado, UPM, Madri, Espanha.
- Carlsson, C., Schubert, M. B., Werner, J. H., 2005. *Static-Trough Concentrators Under Stuttgart Insolation Conditions*. 20<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Espanha, pp. 2418-2421.
- Copetti, J. B., Macagnan, M. H. e Zanesco, I., 1995. *Photovoltaic Option for Rural Areas in Southern Brazil*. 13<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Nice, França, pp. 1150-1153.
- Febras, F. S., Moehlecke, A., Zanesco, I., 2009. *Experimental Study of Static Concentrator Modules with Diffuse Reflector*. 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, pp. 807-810.
- Gombert, A., Hakenjos, A., Heile, I., Wüllner, J., Gerstmaier, T., Riesen S., 2009. *Flatcon CPV Systems – Field Data and New Developments*. 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, pp. 156-158.
- Kazmerski, L., 2002. *Photovoltaics – Exploding the Myths*, Renewable Energy World - Review Issue 2002-2003, vol. 5, n. 4, pp. 174-183.
- Klotz, F. H., Mohring, H., 2007. *Integrated Parabolic Trough (IPT) for Low Concentration System – Operation Experiences in South- and Central-Europe*. 22<sup>nd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, pp. 140-143.
- Martinez, M., Rubia, O., Sánchez, D., Garcia, M. L., Coronado, R., Rubio, F., Pachón, J. L., Banda, P., 2008. *Concentrator Photovoltaics Connected to the Grid and System Rating*. 23<sup>rd</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, Espanha, pp. 146-150.
- Minãno, J.C., 1988. *Static Concentration*, International Journal of Solar Energy, v. 6, pp. 367-368.
- Moehlecke, A., Zanesco, I., Pan, A. C., Severo, T. C., Mallmann, A.P., 2001. *Photovoltaic Module with Coloured Diffuse Reflectors*. 17<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, pp. 785-787.
- Muhal, H., Bruton, T. M., 2009. *A Cost Effective Silicon Based Concentrator System at 120X*. 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, Germany, pp. 774-776.
- Pietruszko, S. M., Gradzki, M., *Opto-Electronics Review*, v. 12, pp. 91-93.
- Rummyantsev, V. D., Andreev, V. M., Sadchikov, N. A., Bett, A. W., Dimroth, F., Lange, G., 2002. *Experimental Installations with High-Concentration PV Modules Using III-V Solar Cells*. PV in Europe – from PV Technology to Energy Solutions, Rome, Italy, pp. 7-11.
- Severo, T.C., 2005. *Desenvolvimento do Módulo Fotovoltaico Concentrador Estático HELIUS para Sistemas Autônomos*, Dissertação de Mestrado, PGETEMA, PUCRS, Porto Alegre.
- Severo, T.C., Zanesco, I., Moehlecke, A., 2007. *Projeto e Análise do Módulo Concentrador HELIUS para Sistemas Autônomos*, I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, Brasil.
- Slade, A., Garboushian, V., 2007. *500x Silicon Concentrator Cells and 20 % Modules for Mass Production*. 24<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, pp. 879-882.
- Tripanagnostopoulos, Y., Souliotis, M., Tselepis, S., Dimitriou, V., Makris, Th., 2005. *Design and Performance Aspects for Low Concentration Photovoltaics*. 20<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Espanha, pp. 2311-2314.
- Urbano, J. A., Matsumoto, Y., Asomoza, R., 2003. *5 Wp PV Module-Based Stand-Alone Solar Tracking System*. 3<sup>rd</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conference, Osaka, Japan, pp. 11-18.
- Winston, R., Welford, W. T., 1989. *High Collection Nonimaging Optics*. Academic Press.
- Zacharopoulos, A., Eames, P. C., McLarnon, D., Norton, B., *Linear Dielectric Non-Imaging Concentrating Covers for PV Integrated Building Facades*, Solar Energy, v. 68, pp. 439-452.
- Zanesco, I. 1996. *Concentradores Estáticos con Células Bifaciales para Sistemas Fotovoltaicos Autônomos*, Tese de Doutorado, UPM, Madri, Espanha.
- Zanesco, I., Lorenzo, E., *Optimization of an Asymmetric Static Concentrator: The PEC-44D*, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 10, pp. 361 – 376.
- Zanesco, I., Moehlecke, A., Medeiros, G.S., Mallmann, A.P., Alcântara, A.P., 2004. *Analytic Method for Sizing Stand-Alone PV Systems in Brazil*. 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, França, pp. 2375-2378.
- Zanesco, I., Moehlecke, A., Pereira, M.S., Severo, T. C., 2006. *Análise de Módulos Fotovoltaicos Concentradores Estáticos em Fachadas*. XI Congresso Brasileiro de Energia – XI CBE, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 995-1004.

## DEVELOPMENT OF HELIUS 33X PHOTOVOLTAIC MODULE FOR STAND-ALONE SYSTEM

**Abstract.** Static concentrator PV modules in stand-alone systems is a way of reducing the cost of the electric power. When bifacial solar cells are used on this kind of module, a remarkable cost reduction could be achievable. The goal of this paper is to present the development of a new static concentrator module, called HELIUS 33 X, which uses bifacial solar cells. The optical system is linear and it is not filled with any kind of material. We established that the slope of the module is 48° and the average daily electrical output can be approximately the same along the year, in order to fit in well with constant energy demand typical of a stand-alone photovoltaic system. Based on the analysis of monthly average hourly irradiation and monthly average daily irradiation, the behavior of the static concentrator module HELIUS 33X was determined and the hourly concentration ratios were calculated in order to obtain the expected performance of the concentrator. Optical losses and the reflectance were considered. A prototype of the module HELIUS 33X was constructed to characterize the experimental performance of concentrator. The experimental values

of the concentration ratio agree with the estimated, confirming the behavior of the module HELIUS 33X during the year. We concluded that the electric power produced by HELIUS 33X is up to 106 % higher than that produced by a standard module, with same area of solar cells.

**Keywords:** *Static Concentrator PV Module, Stand Alone Systems, Bifacial Solar Cells*