

OTIMIZAÇÃO DO MÓDULO FOTOVOLTAICO CONCENTRADOR ESTÁTICO PLANO MODIFICADO

Heston Silveira, Izete Zanescio e Adriano Moehlecke

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS

Faculdade de Física – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais

Av. Ipiranga, 6681 Prédio 96A - Porto Alegre - RS – CEP: 90619-900 - Brasil

Izete@puccrs.br

Resumo. Os módulos fotovoltaicos concentradores estáticos caracterizam-se por concentrar os raios solares sobre as células, através de um sistema óptico, sem necessitar de um mecanismo para seguir o Sol. Se estes módulos forem construídos com células solares bifaciais, pode-se obter reduções significativas nos custos. O sistema óptico do Módulo Fotovoltaico Estático Plano, MEC-P está baseado na reflexão difusa, sendo composto por uma caixa de vidro com a face superior aberta e a face posterior interna pintada de branco. As células solares bifaciais são instaladas na parte superior do sistema óptico. A radiação solar passa entre as células incidindo na superfície branca sendo refletida e incidindo na face posterior das células bifaciais. O objetivo deste trabalho é otimizar e analisar o módulo MEC-P, modificado de forma a facilitar a sua industrialização. A distância entre as células solares e o refletor difuso, bem como a distância entre as tiras de células solares afetam o desempenho do módulo. Desta maneira, otimizou-se estes parâmetros geométricos considerando a radiação incidente na face posterior da célula solar e o custo do módulo. Para otimizar o concentrador, foi desenvolvido um conjunto de equações para determinar o fator de visão entre as tiras de células solares e a superfície do refletor difuso. A melhor espessura para o sistema óptico e a melhor distância entre as tiras de células foi de 6 cm e 10 cm, respectivamente e portanto, o concentrador terá uma área de 60 cm x 120 cm. O custo do MEC-P é de US\$ 2,2 por watt, enquanto que o menor valor encontrado no mercado para um módulo convencional, é de US\$ 3,3 por watt, resultando em uma redução no custo da ordem de 30%. O comportamento do módulo concentrador e de um módulo convencional são similares durante o ano.

Palavras chave: Energia solar, Módulos fotovoltaicos concentradores, Reflexão difusa.

1. Introdução e objetivos

Sabe-se que a sociedade é altamente dependente de energia. De certa forma a sua evolução está relacionada com o desenvolvimento de tecnologias de conversão de energia, com o objetivo de qualificar o modo de vida. No contexto atual, em que os problemas ambientais se agravam e os combustíveis fósseis se esgotam, a produção de energia elétrica não é suficiente e os países industrializados estão preocupados com as fontes não renováveis. Em virtude deste problema, surge o interesse pelas fontes renováveis e limpas para produção de energia.

No Brasil, a crise energética do ano de 2001 provocou um racionamento nas regiões sudeste, centro-oeste e nordeste e uma racionalização na região sul, transformando-se em um problema diário para os brasileiros. Uma das características do sistema elétrico brasileiro é a concentração de mais de 90% de sua matriz energética em centrais hidrelétricas. É possível obter energia elétrica a partir da conversão direta da energia solar, cuja tecnologia é denominada de energia solar fotovoltaica. Esta tecnologia se caracteriza por sua modularidade, simplicidade e rapidez de instalação bem como por ser silenciosa e necessitar pouquíssima manutenção, estar disponível na maior parte do planeta e principalmente, por não contaminar o meio ambiente (Hohmeyer, 1992). A conversão direta da luz solar em energia elétrica é conseguida por meio de dispositivos denominados células solares. Para viabilizar o uso desta tecnologia, estes dispositivos semicondutores são associados, geralmente, em série, para formar um módulo fotovoltaico. Por fim, associando módulos, implementa-se um sistema fotovoltaico com a potência desejada.

Os módulos fotovoltaicos podem ser convencionais ou concentradores. Um tipo de módulo fotovoltaico concentrador estático é o que se baseia na reflexão difusa. O objetivo deste trabalho centra-se na otimização do módulo fotovoltaico concentrador estático, MEC-P, modificado de forma a facilitar a sua fabricação em linha de produção.

2. Desenvolvimento do modelo matemático.

2.1 Características do módulo concentrador estático plano modificado

O primeiro módulo fotovoltaico concentrador estático plano, denominado MEC-P, foi proposto por pesquisadores da PUCRS e UFRGS (Moehlecke e Krenzinger, 1991). Este dispositivo consiste em um sistema óptico com reflexão difusa e células solares bifaciais. O sistema óptico tem a forma de uma caixa de vidro com a face superior aberta e a face posterior interna pintada de branco a fim de formar o refletor difuso. Na face superior do sistema óptico são instaladas as células solares bifaciais encapsuladas e distribuídas de tal forma que permitem a incidência de radiação solar no refletor. No primeiro modelo proposto, as células solares circulares eram distribuídas uniformemente, como ilustra a Fig (1), dificultando a industrialização. Portanto, a fim de viabilizar a construção do módulo, é proposto que as células sejam encapsuladas em tiras.



Figura 1. Primeiro protótipo do módulo concentrador estático plano (MEC-P).

No módulo concentrador estático plano proposto, as laterais são de vidro e o fundo é constituído de fibra de vidro e resina poliéster, com a parte interna pintada de branco. As células bifaciais circulares são substituídas por 3 tiras de células bifaciais quadradas com aresta de 10 cm, como mostra a Fig. (2). As bordas laterais são transparentes para evitarem sombras nas primeiras horas da manhã e da tarde. A superfície frontal do módulo é constituída de vidro e a face posterior das células bifaciais é encapsulada com E.V.A. (Acetato de Etil Venila). As dimensões deste dispositivo estão relacionadas com a otimização de dois parâmetros que são a profundidade (h) do refletor difuso em relação a face posterior das células e a distância entre as tiras de células (dcc), medida a partir do centro de cada uma, conforme ilustra Fig. (2). Estes parâmetros, além de determinar o tamanho do concentrador, estão intimamente ligados ao seu custo de fabricação e à energia elétrica produzida.

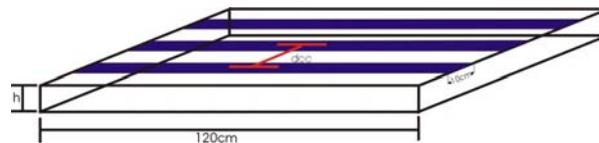


Figura 2. Esquema do módulo MEC-P modificado e parâmetros geométricos a serem otimizados: distância entre as tiras de células (dcc) e espessura do módulo (h).

2.2. Fator de visão ou fator de forma

Para desenvolver o modelo matemático para a otimização do módulo concentrador é necessário o conceito de fator de visão e a álgebra associada. Em outras palavras, é necessário obter uma expressão geral para a transferência de energia entre estas duas superfícies quando mantidas a diferentes temperaturas. Para realizar esta análise, é necessário calcular a quantidade de energia que deixa uma superfície e atinge a outra, isto é, a troca de radiação entre as superfícies. O fator de visão ou fator de forma entre duas superfícies é por definição, a fração de energia refletida (ou emitida) que deixa uma superfície e chega na outra (Holmann, 1993; Sparrow, 1978). A Fig. (3) mostra duas superfícies cujas áreas são A_1 e A_2 , e que estão separadas por um meio, como por exemplo, o ar.

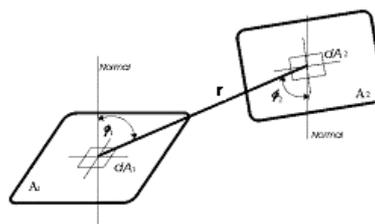


Figura 3. Diagrama mostrando as superfícies, os elementos de área, e os ângulos ϕ_1 e ϕ_2 , utilizados para a obtenção do fator de visão entre as duas superfícies.

F_{12} é a fração de energia que deixa a superfície 1 e chega na superfície 2 e F_{21} é a fração de energia que deixa a superfície 2 e chega à superfície 1. Para obter uma relação geral para F_{12} (ou F_{21}), consideram-se os elementos de área dA_1 e dA_2 mostrados na Fig. (3). Os ângulos ϕ_1 e ϕ_2 são medidos entre a normal às superfícies e a linha r , que representa a distância entre os elementos de área.

A projeção de dA_1 sobre a linha r , que une os centros dos elementos de área é:

$$dA_1 \cos \phi_1 \quad (1)$$

Sabendo que B_1 representa a energia por unidade de tempo e área que deixa a superfície infinitesimal dA_1 , a intensidade correspondente é dada por (Holmann, 1993; Sparrow, 1978):

$$I_1 = \frac{B_1}{\pi} \quad (2)$$

A potência irradiada $d\phi_1$ que deixa o elemento de superfície dA_1 em direção a superfície infinitesimal dA_2 é definida por:

$$d\phi_1 = I_1 dA_1 \cos\phi_1 d\omega \quad (3)$$

onde $d\omega$ é o ângulo sólido, que por definição é (Sparrow, 1978):

$$d\omega = \frac{dA_2 \cos\phi_2}{r^2} \quad (4)$$

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (3) e escrevendo I_1 em função de B_1 , obtém-se:

$$d\phi_1 = \frac{B_1 \cos\phi_1 \cos\phi_2 dA_1 dA_2}{\pi r^2} \quad (5)$$

A potência irradiada que deixa dA_1 em todas as direções é dada por:

$$B_1 dA_1 \quad (6)$$

A razão entre as Eq. (5) e (6) representa a fração de energia que deixa dA_1 e que incide em dA_2 , ou seja:

$$dF_{dA_1-dA_2} = \frac{\cos\phi_1 \cos\phi_2 dA_2}{\pi r^2} \quad (7)$$

A Equação (7) é a definição do fator de visão, também denominada de fator de forma. Desta equação, nota-se que o fator de visão é proporcional ao elemento de área dA_2 . Da mesma forma, a fração de energia que sai da superfície infinitesimal dA_2 e chega a dA_1 é representada por:

$$dF_{dA_2-dA_1} = \frac{\cos\phi_2 \cos\phi_1 dA_1}{\pi r^2} \quad (8)$$

Fazendo a razão entre as Eq. (7) e (8), obtém-se a seguinte relação:

$$dA_1 dF_{dA_1-dA_2} = dA_2 dF_{dA_2-dA_1} \quad (9)$$

Esta relação é denominada de relação de reciprocidade, e é de grande utilidade para a álgebra do fator de visão e para a determinação do mesmo para o módulo concentrador a ser otimizado.

Quando se trata com superfícies finitas, a Eq. (8) deve ser integrada na área A_1 , A_2 ou ambas. Deste modo, chega-se nas seguintes expressões:

$$F_{dA_1-A_2} = \int_{A_2} \frac{\cos\phi_1 \cos\phi_2}{\pi r^2} dA_2 \quad (10)$$

ou

$$F_{A_1-A_2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{B_1 \cos\phi_1 \cos\phi_2 dA_1 dA_2}{\pi r^2} \quad (11)$$

Repetindo o procedimento anterior, obtém-se a relação de reciprocidade:

$$A_1 F_{A_1-A_2} = A_2 F_{A_2-A_1} \quad (12)$$

Para simplificar, o fator de visão da superfície 1 para a superfície 2 ($F_{A_1-A_2}$) será representado por F_{12} .

A solução da Eq. (11) depende da configuração das áreas. Na Fig. (4) apresenta-se a configuração que é utilizada para calcular o fator de visão entre o refletor difuso do módulo MEC-P modificado e a face posterior das células bifaciais.

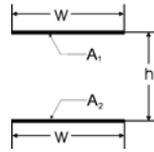


Figura 4. Configuração selecionada para a determinação do fator de visão entre duas superfícies.

A solução analítica para o caso mostrado da Fig. (4) é dada por (Siegel e Howell, 2001):

$$F_{1-2} = F_{2-1} = \sqrt{1 + H^2} - H \quad (13)$$

onde $H = \frac{h}{W}$

3. Desenvolvimento do modelo matemático para o cálculo do fator de visão

O comportamento do módulo MEC-P pode ser descrito a partir da análise da trajetória dos raios solares. Na Fig. (5), apresenta-se a vista lateral do mesmo e o esquema dos raios que chegam até o refletor difuso e são refletidos para a parte posterior das células bifaciais.

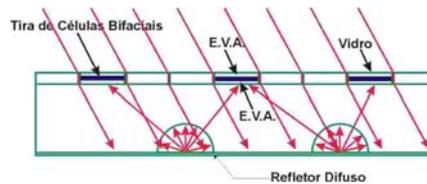


Figura 5. Vista lateral do módulo concentrador estático plano e esquema da trajetória dos raios solares.

Para determinar os melhores parâmetros de dimensionamento é necessário, primeiramente, obter o fator de visão entre o refletor difuso e a face posterior das células bifaciais. O fator de visão entre estas duas superfícies é determinado a partir da álgebra dos fatores de visão que afirma que o fator de visão entre duas superfícies combinadas é igual a soma dos fatores de visão das mesmas (Holmann, 1983 e Sparrow, 1978). Portanto, ao analisarmos as superfícies envolvidas, verifica-se que é necessário separar o refletor difuso em várias áreas, com base na área das tiras de células, pois a mesma é fixa. Na Fig. (6) apresenta-se a distribuição das áreas considerando que os raios solares incidem perpendicularmente na superfície do módulo.

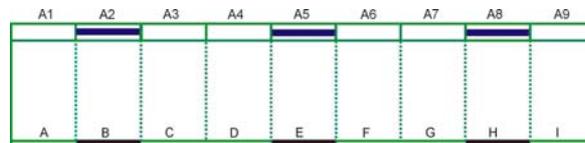


Figura 6. Esquema representando as áreas envolvidas no processo para a determinação do fator de visão entre o refletor difuso e a face posterior das células bifaciais.

Aplicando então a álgebra dos fatores de visão para o esquema representado na Fig. (6), e lembrando da reciprocidade entre as áreas e o fator de visão, conforme descrito na Eq. (12), obtém-se a seguinte relação, para a tira de células da borda esquerda, representada pela A₂.

$$\begin{aligned} A_2 F_{2ACDFGI} = & \frac{1}{2} (A_{12} F_{12AB} - A_1 F_{1A} - 2 A_2 F_{2B} + A_{234} F_{234BCD} - A_{34} F_{34CD} - A_{2345} F_{2345BCDE} \\ & + A_{345} F_{345CDE} + A_{234567} F_{234567BCDEFG} - A_{34567} F_{34567CDEFG} + A_{23456789} F_{23456789BCDEFGHI} - \\ & - A_{3456789} F_{3456789CDEFGHI} - A_{2345678} F_{2345678BCDEFGH} + A_{345678} F_{345678CDEFGH}) \end{aligned} \quad (14)$$

Então a partir da Eq. (14), determina-se o fator de visão entre a tira de células e a região do refletor em que a irradiância incide diretamente. Um procedimento similar foi realizado para a região do refletor com sombra. Neste caso obteve-se:

$$A_2F_{2BEH} = \frac{1}{2} (2A_2F_{2B} + A_{2345}F_{2345BCDE} - A_{234}F_{234BCD} + A_{34}F_{34CD} - A_{345}F_{345CDE} + \\ + A_{2345678}F_{2345678BCDEFGH} + A_{34567}F_{34567CDEFG} - A_{234567}F_{234567BCDEFG} - A_{345678}F_{345678CDEFGH}) \quad (15)$$

Também obteve-se relações similares a encontrada na Eq. (14), para tira da borda da direita e central do concentrador para comparar o fator de visão para as tiras da borda com o fator de visão da tira central. Fixou-se uma distância entre os centros das tiras de células de 30 cm e variou-se a distância entre a face posterior das tiras de células e o refletor difuso, isto é, a espessura do módulo. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. (7).

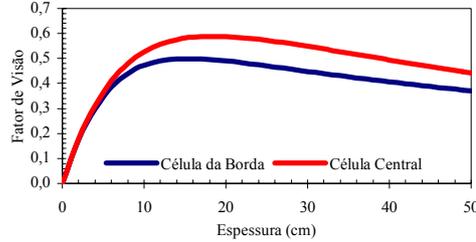


Figura 7. Comparação entre o fator de visão correspondente a tira de células central e da borda, em função da espessura do módulo MEC-P modificado.

Analisando a Fig. (7) conclui-se que o fator de visão relativo às tiras de células das bordas é menor que o correspondente a tira central. Como a corrente elétrica é diretamente proporcional ao valor da irradiância, e considerando que as tiras estarão associadas em série o comportamento do dispositivo será limitado pela tira de células da borda. Devido a este fato, a otimização do módulo MEC-P foi realizada em função das tiras das bordas.

4. Determinação dos parâmetros ótimos

Para determinar qual a melhor distância entre a face posterior das células e a superfície refletora, denominada de espessura do concentrador, e a melhor distância entre as tiras de células, é necessário analisar a influência destes parâmetros no custo e na resposta do módulo. Esta última pode ser avaliada através da concentração óptica, pois esta possui uma relação direta com a corrente elétrica produzida pelo módulo. Cabe ressaltar que, neste caso, quanto maior a concentração óptica, maior será o custo e, portanto, as dimensões ótimas do módulo estão diretamente relacionadas com ambos parâmetros.

Para avaliar a irradiância direta incidente na face frontal das células bifaciais considerou-se a reflexão no vidro (Duffie e Beckman, 1980) e para a componente difusa foi considerada uma reflexão de 8% (Duffie e Beckman, 1980). A irradiância incidente na face posterior da célula é determinada considerando as perdas por reflexão no vidro e na face posterior das células, a refletância da superfície branca e o fator de visão entre a superfície refletora e a tira de células da borda. A concentração óptica, C_{OP} , é definida como a razão entre a irradiância incidente nas células solares quando associadas a um sistema óptico e a irradiância que receberiam as células sem o sistema óptico (Lorenzo, 1994; Luque, 1989). Neste caso, é dada por:

$$C_{OP} = \frac{I_F \tau_{BP} + (((F_{C-I} \cdot I_F \cdot \tau_{BS} \cdot \tau_{BP}) + (F_{C-S} \cdot I_D \cdot \tau_{DS} \cdot \tau_{DP})) \rho_r \cdot \tau_{EPos})}{I_F \tau_{BP}} \quad (16)$$

onde I_D é a irradiância difusa, I_F é a irradiância total, ambas incidentes na superfície frontal do módulo. τ_{BP} é a transmitância da irradiação direta na primeira interface (ar/vidro), F_{C-I} é o fator de visão entre a tira de células e a área iluminada diretamente, τ_{BS} é a transmitância da irradiação direta na segunda interface (vidro/ar), τ_{DP} é a transmitância da irradiação difusa na primeira interface (ar/vidro), τ_{DS} é a transmitância da irradiância difusa na segunda interface (vidro/ar), ρ_r é a refletância do refletor, F_{C-S} é o fator de visão entre a tira de células e a região de sombra e τ_{EPos} é a transmitância do encapsulamento na parte posterior da célula.

Para otimizar o módulo MEC-P proposto, considerou-se que os raios solares incidem perpendicularmente à superfície, que a irradiância incidente é de 1000 W/m² e que 20% deste valor é difusa. O valor de 1000W/m² foi utilizado por ser uma das condições padrão para a caracterização de módulos fotovoltaicos e facilita a comparação com módulos convencionais A refletância da superfície branca foi considerada igual a 0,85 (Moehlecke, 1991). O valor de 20% de radiação difusa em relação a total foi obtido a partir do cálculo da irradiação solar diária incidente na superfície do módulo com o melhor ângulo de inclinação ($\beta=48^\circ$) em Porto Alegre (Zanenco, 1996). Foi considerada uma base de dados de dez anos e valores de irradiação horária superior a 600 Wh/m², pois nestes casos a potência elétrica produzida pelo módulo é mais significativa.

Primeiramente, analisa-se a C_{OP} em função da área e da espessura do módulo. Os resultados são apresentados na

Fig. (8). Cabe lembrar que o comprimento do módulo é fixo e igual a 120 cm. Portanto, a área varia em função da distância entre os centros das tiras de células.

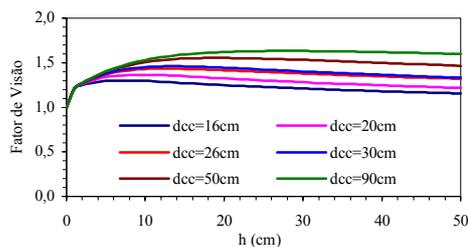


Figura 8. Concentração óptica em função da variação da área do módulo e da distância entre o refletor difuso e a face posterior da tira de células.

Ao analisar a Fig. (8) nota-se que a concentração óptica aumenta até uma espessura de aproximadamente 10 cm e quanto maior a área do módulo maior a sua concentração óptica. Porém nesta situação, o custo também aumenta, sendo necessária uma análise deste parâmetro. Para realizar a análise de custos considerou-se que as quatro laterais do sistema óptico são de vidro temperado de alta transparência e que a parte inferior é constituída de fibra de vidro e resina, com a superfície interna pintada de branco. Em relação a superfície frontal do módulo, considerou-se o valor correspondente a 36 células solares encapsuladas, isto é, o custo de um módulo convencional, e que o restante de área é constituída por vidro temperado de alta transparência. Para determinar as melhores dimensões do módulo fez-se necessária uma análise do custo em função da concentração óptica. Assim, na Fig. (9) analisa-se a razão entre o custo e a concentração óptica em função dos parâmetros de dimensionamento do módulo concentrador.

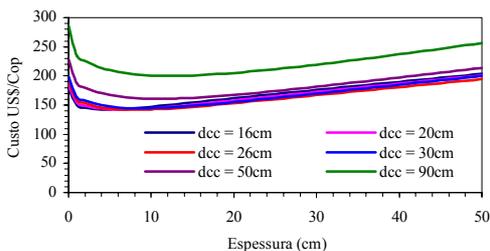


Figura 9. Razão entre custo e concentração óptica em função da espessura e da área do módulo.

Observa-se que a melhor configuração, em função do custo e da concentração óptica, corresponde a distância entre os centros das células de 20 cm e a espessura de 6 cm. Portanto, a área do módulo MEC-P é de 60 cm x 120 cm e a concentração óptica é de 1,35. Comparando este dispositivo com um módulo convencional constata-se que a potência produzida, sob condições padrão de medida ($1000\text{W}/\text{m}^2$) é de 65 W enquanto que a potência para o módulo convencional utilizado nesta análise é de 50 W. Continuando esta análise, obtém-se que o custo do módulo MEC-P otimizado é de US\$ 2,20 por watt. Comparando este resultado com o menor valor encontrado no mercado para módulos convencionais, que é US\$ 3,30 por watt, conclui-se que a redução no custo é da ordem de 30%.

5. Comportamento do fator de visão em função do ângulo de incidência

Com os dois parâmetros do concentrador otimizados, foi determinado o comportamento do fator de visão em função do ângulo de incidência a fim de analisar o comportamento do módulo concentrador ao longo do ano. A Fig. (10) ilustra o movimento da sombra produzida pelas tiras de células sobre o refletor difuso e as áreas que surgem em função desta movimentação. A determinação do fator de visão a partir do modelo matemático selecionado para o módulo MEC-P é válido somente para áreas frontais. Nesta situação, onde a maioria das áreas não são frontais, foi necessário utilizar o princípio da reciprocidade e a álgebra dos fatores de visão.

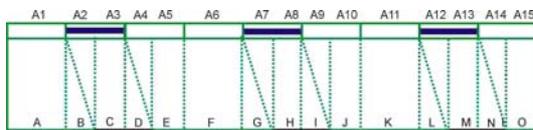


Figura 10. Esquema da movimentação da sombra sobre o refletor difuso e as áreas associadas para a solução do problema.

Baseando-se no esquema representado na Fig. (10), determinaram-se os fatores de visão entre todas as áreas envolvidas (Silveira, 2003) no processo de troca de radiação e a equação final para o cálculo do fator de visão entre a tira de células da borda esquerda e a área iluminada é:

$$\begin{aligned}
 A_{23}F_{23ABEFGJKLO} = & \frac{1}{2}(A_{123}F_{123ABC} - A_{4567}F_{4567DEFG} - A_{234}F_{234BCD} - A_1F_{1A} + A_2F_{2B} - \\
 & - A_3F_{3C} + A_4F_{4D} + A_{456789}F_{456789DEFGHI} - A_{456789101112131415}F_{456789101112131415DEFGHIJKLMNO} + \\
 & + A_{4567891011121314}F_{4567891011121314DEFGHIJKLMN} - A_{456789101112}F_{456789101112DEFGHIJKL} + \\
 & + A_{234567}F_{234567BCDEFG} - A_{23456789}F_{23456789BCDEFGHI} + A_{23456789101112}F_{23456789101112BCDEFGHIJKL} - \\
 & - A_{234567891011121314}F_{234567891011121314BCDEFGHIJKLMN} + \\
 & + A_{23456789101112131415}F_{23456789101112131415BCDEFGHIJKLMNO})
 \end{aligned} \quad (17)$$

Para o fator de visão entre a tira de células e as regiões com sombra obteve-se o seguinte resultado:

$$\begin{aligned}
 A_{23}F_{23CDHIMN} = & A_{4567}F_{4567DEFG} + A_{23}F_{23BC} + A_{234}F_{234BCD} - 2A_2F_{2B} - 2A_3F_{3C} - A_4F_{4D} - \\
 & - A_{456789}F_{456789DEFGHI} + A_{456789101112}F_{456789101112DEFGHIJKL} - A_{234567}F_{234567BCDEFG} - \\
 & - A_{4567891011121314}F_{4567891011121314DEFGHIJKLMN} + A_{23456789}F_{23456789BCDEFGHI} - \\
 & - A_{23456789101112}F_{23456789101112BCDEFGHIJKL} + A_{234567891011121314}F_{234567891011121314BCDEFGHIJKLMN}
 \end{aligned} \quad (18)$$

Como a variação da sombra depende do ângulo de incidência projetado sobre o meridiano local (θ_{ip}) e estes variam durante o dia de 0° a 90° , foi necessário estabelecer a relação anterior para o cálculo do fator de visão para outras cinco configurações da posição da sombra em relação às tiras de células. Os valores do fator de visão encontrados para este método são apresentados na Fig. (11). Analisando o comportamento do fator de visão durante o dia, verifica-se que quanto mais a sombra desloca-se, deixando a parte do refletor sob as tiras de células mais iluminada maior é o fator de visão e, portanto, um maior percentual da irradiância chega na face posterior das células. Cabe lembrar que os maiores valores do fator de visão ocorrem para os maiores ângulos de incidência, que correspondem as primeiras horas da manhã e as últimas da tarde, onde os valores da irradiação são baixos.

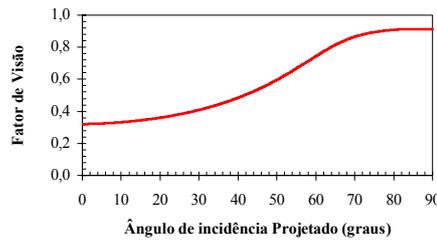


Figura 11. Comportamento do fator de visão em relação à variação do ângulo de incidência dos raios solares projetados sobre o meridiano local.

Nesta análise não considerou-se as múltiplas reflexões entre o vidro e o refletor difuso e que a reflexão nas laterais do sistema óptico é diferente da reflexão na superfície do concentrador. Também desconsiderou-se que quando associa-se o módulo com outros nas primeiras e nas últimas horas do dia, aparece uma região menos iluminada. Porém, a influência destes fatores na resposta do módulo é muito pequena.

6. Validação experimental do modelo matemático

Foi confeccionado um protótipo para avaliar o modelo matemático desenvolvido que permite determinar o comportamento do módulo concentrador. A Fig. (12) ilustra o protótipo montado. O protótipo foi projetado para simular o funcionamento da tira de células central, a fim de facilitar as medidas e evitar a influência de reflexões externas. O refletor difuso foi confeccionado a partir de uma superfície de madeira pintada de branco com comprimento de 50 cm e largura de 30 cm. A fim de simular a tira de células, foi confeccionada, também em madeira, uma tira de 10 cm de largura e 30 cm de comprimento. Nesta tira foi acoplada uma célula solar de silício monocristalino, de 10 cm por 5 cm, previamente calibrada, que serve para medir a irradiância solar. A superfície restante da tira foi recoberta com papel camurça azul escuro de cor similar a da célula. A tira de madeira foi fixada no refletor sobre suportes de 10 cm de altura e 5 cm de largura e ambos foram recobertos com papel camurça azul escuro.

O protótipo foi direcionado de tal forma que o ângulo de incidência correspondia ao ângulo projetado sobre o meridiano local. Inicialmente mediu-se, através da célula solar, a irradiância incidente na superfície do módulo MEC-P. Em seguida, a tira de madeira com a célula solar acoplada era virada para medir a irradiância que provinha do refletor difuso.



Figura 12. Protótipo confeccionado para validar o modelo matemático desenvolvido.

Nas duas situações mencionadas, inclinou-se o protótipo variando o ângulo de incidência dos raios solares de 0° a 65° , de 5° em 5° . As medidas foram realizadas durante um dia com céu sem nuvens com auxílio de um dispositivo que permite medir o ângulo de incidência, mostrado na Fig (13). A superfície deste dispositivo foi recoberta com um tecido preto, a fim de evitar a influência da refletância do mesmo.



Figura 13. Dispositivo utilizado para medir o ângulo de incidência da radiação solar.

Também foram realizadas medidas para comparar a irradiância difusa com a irradiância na região da sombra produzida pelas tiras de células. Para estas medidas, utilizou-se uma célula solar encapsulada e calibrada. Montou-se um sistema constituído de uma tira de 3 cm de largura que, quando encurvada, produziu uma semi-circunferência de 63,5 cm de diâmetro. Esta tira foi acoplada a uma superfície de madeira pintada com tinta preta fosca. A parte interna da tira também foi pintada de preto para evitar reflexões. Desta forma, foi possível obter um dispositivo similar aos comerciais usados para medir a componente difusa da radiação solar. A Fig. (14) mostra o sistema montado e a célula calibrada na posição de medida.



Figura 14. Dispositivo utilizado para medir a irradiância difusa.

Cabe ressaltar que tanto a célula associada ao protótipo quanto a outra célula encapsulada foram associadas a resistores para facilitar a medida da irradiância solar. Desta forma a corrente elétrica gerada pela célula solar é medida através da diferença de potencial sobre o resistor, que é diretamente proporcional a irradiância solar incidente.

7. Resultados experimentais

A partir dos dados experimentais da componente difusa de irradiância solar e da irradiância total incidente na face frontal das células, calculou-se o percentual de difusa em relação a irradiância total para um dia com céu sem nuvens. O valor médio encontrado foi 10% e não foi constatada uma relação clara com o ângulo de incidência. Ao comparar as medidas da irradiância na região de sombra sobre o refletor, constatou-se que esta última é superior. Portanto, foi necessário determinar a relação entre as duas irradiâncias difusa e efetuar a correção, pois, para determinar a C_{OP} a partir do modelo desenvolvido é necessário utilizar a irradiância difusa na região do refletor com sombra.

A concentração óptica foi determinada a partir dos valores experimentais e a partir do modelo matemático desenvolvido para o cálculo do fator de visão os resultados são apresentados na Fig (15). As diferenças encontradas entre os valores da C_{OP} calculados e medidos, são, em média de 10% e diminuem em função do ângulo de incidência. Também verifica-se que os valores estimados são inferiores aos experimentais e que existe uma tendência de ambas concentrações ópticas aumentarem com o ângulo de incidência.

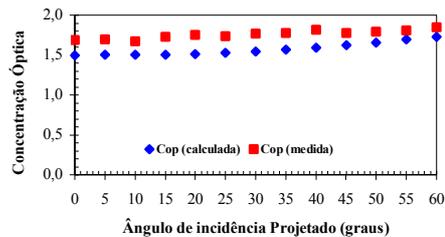


Figura 15. Comparação entre os valores da concentração óptica estimada e experimental em função do ângulo de incidência projetado sobre o meridiano local.

8. Análise da resposta ao longo do ano

Considerou-se o módulo MEC-P otimizado e instalado sobre uma superfície voltada ao norte, com um ângulo de inclinação de 48° (Zanesco, 1996) em Porto Alegre. Por tratar-se de um módulo concentrador estático, em que sua resposta varia ao longo do dia, foi necessário utilizar dados de irradiação solar horários.

A metodologia adotada para estimar os valores horários da irradiação solar sobre uma superfície horizontal a partir da irradiação diária média mensal sobre uma superfície inclinada foi desenvolvida em um trabalho anterior (Zanesco, 1996). Inicialmente, a partir da irradiação diária média mensal sobre um plano horizontal, catalogada na base de dados “International H-World”(1993) e do cálculo da irradiação extraterrestre horizontal diária média mensal (Duffie e Beckman, 1980; Iqbal, 1983), determinaram-se os índices de transparência K_T diários médios mensais. Com estes valores e através do método de Aguiar (Aguiar et al, 1988), foi possível gerar uma série de índices de transparência diários para dez anos e, então, determinar a irradiação diária global. Os valores diários são separados em suas componentes direta e difusa, através do método proposto por Collares – Pereira e Rabl (Duffie e Beckman, 1980). Então, a irradiação total e difusa horária foi estimada a partir das expressões propostas por Liu e Jordan e Collares – Pereira e Rabl (Duffie e Beckman, 1980). A componente horária difusa sobre uma superfície inclinada foi calculada a partir do método proposto por Perez (Perez, 1987).

Consideraram-se as reflexões no vidro separadamente para a radiação direta e difusa, a refletância do refletor difuso e a reflexão do E.V.A. na face posterior das células similar aquela que ocorre no vidro. Considera-se que a eficiência da face posterior das células é 90% da eficiência da face frontal (Bowden et alii, 1995),(Cañizo et alii, 2000).

Na Fig. 15, comparam-se estes resultados com os valores da irradiação relativos a um módulo convencional com a mesma área de células solares. Observa-se que a resposta dos dois módulos é similar ao longo do ano. No entanto, a energia elétrica produzida pelo módulo concentrador, que é proporcional a irradiação, é, em média 35% superior.

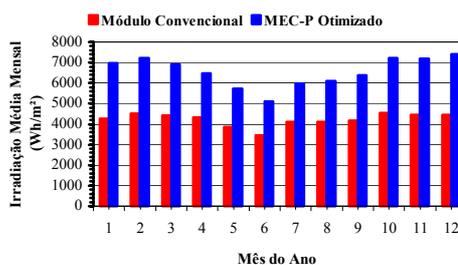


Figura 15. Comparação entre a irradiação diária média mensal relativa a um módulo convencional e ao módulo MEC-P otimizado.

9. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi otimizar e analisar o módulo concentrador estático plano MEC-P, modificado de tal forma que facilite sua fabricação industrial. Para otimizar os parâmetros de dimensionamento, isto é, a área e a espessura do módulo, bem como para analisar o seu comportamento ao longo do ano, desenvolveu-se um modelo matemático com base na álgebra dos fatores de visão. O modelo matemático desenvolvido foi comprovado experimentalmente, sendo os resultados experimentais aproximadamente 10% superiores aos teóricos.

Como resultado da otimização foi encontrado que a espessura é de 6 cm e a distância entre as tiras de células de 10 cm. Portanto, a área total do mesmo será de $0,72 \text{ m}^2$. A concentração óptica para o MEC-P modificado e otimizado é de 1,35. O valor encontrado a sua potência é 65 W, a um custo de aproximadamente US\$ 142,00, ou seja, US\$ 2,20 por watt. Quando compararmos o custo com o de um módulo convencional, de silício monocristalino encontrado no mercado internacional, que é de US\$ 3,30 por watt, constata-se uma redução da ordem de 30%.

Através de uma simulação numérica foi estimado o comportamento do módulo ao longo do ano. Ao comparar a resposta do módulo concentrador com um módulo convencional, ambos com a mesma área de células, conclui-se que os comportamentos são similares, porém o módulo MEC-P produz em média 35% a mais de energia elétrica.

10. Agradecimentos

H. Silveira agradece a bolsa de estudos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior); I. Zanesco e A. Moehlecke agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela concessão da bolsa de produtividade em pesquisa.

11. Referências

- Aguiar, R.J., Collares-Pereira, M., Conde, J. P., 1988. "Simple Procedure for Generating Sequences of Daily Radiation Values Using a Library of Markov Transition Matrices". *Solar Energy*, 40(3). pp. 269-279.
- Base de Dados Internacional H-WORLD, 1993. "Valores Médios de Irradiación Solar sobre Suelo Horizontal. Censolar", Progensa. Sevilla. 106p.
- Bowden, S., Wenhhan, S.R., Green, M.A., 1995. "Application of Static Concentrator to Photovoltaic roof titles". *Progress in Photovoltaics*, (3), pp. 413-423.
- Cañizo, C., Moehlecke, A., Zanesco, I. e Luque, A., 2000. "Cz bifacial silicon solar cells. *IEEE Electron Device Letters*". Vol. 21, N° 4, pp.179-180.
- Duffie, J. A. e Beckman, W., 1980. "Solar engineering of thermal processes". 10th Wiley. New York. 762p.
- Hohmeyer, O., 1992. "The Social Costs of Electricity-Renewables Versus Fossil and Nuclear Energy". *Int. J. Solar Energy*, Vol.II, pp 231-250.
- Holmann, J. P., 1983. "Transferência de Calor", McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 639p.
- Iqbal, M., 1983. "An introduction to solar radiation". Academic Press. New York. 390p.
- Lorenzo, E., 1994. "Electricidad solar: ingenieria de los sistemas fotovoltaicos". Progensa. Sevilla. 338p.
- Luque, A., 1989. "Solar cells and optics for photovoltaic concentration. Bristol e Filadélfia", Adam Hilger, 531p.
- Moehlecke, A. e Krenzinger, A., 1991. "A Modules assembled with diffuse reflectors for photovoltaic bifacial cells". 10th European Photovoltaic Solar Energy Conference. Lisboa. pp. 967 -970.
- Moehlecke, A., 1991. "Módulos Planos com Refletores Difusos para Células Fotovoltaicas Bifaciais". Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 130p
- Perez, R. et alii., 1987. "A New Simplified Version of the Perez Diffuse Irradiance Model for Tilted Surfaces". *Solar Energy*, 39(3), pp. 221-231.
- Siegel, R., e Howell, J.R., 2001. "Thermal Radiation Heat Transfer". Taylor and Francis, NY. 864p.
- Silveira, H., 2003. "Otimização do Módulo Fotovoltaico Concentrador Estático Plano". Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). 86p
- Sparrow, E. M. e Cess, R. D., 1978. "Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill Book Company, New York. 366p.
- Zanesco, I., 1996. "Concentradores Estáticos con Células Bifaciales para Sistemas Fotovoltaicos Autónomos". Tese de Doutorado, Universidad Politécnica de Madrid. 155p.

12. Copyright Notice

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluso neste artigo.

OPTIMIZATION OF THE STATIC PLAIN CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC MODULE MODIFIED

Abstract. *Static concentrator photovoltaic modules concentrate solar rays on the solar cells through an optical system, without the need of a mechanism to follow the sun. If these devices were to be built with bifacial solar cells, active on both faces, it would be possible to obtain a cost reduction. The optical system of the plain static concentrator module, MEC-P, is based on diffuse reflection and it is composed by a box with no lid with the internal surface white painted. The set of bifacial solar cells are assembled over the optical system. The solar radiation that passes among the cells incides on the white surface, and it is reflected back in order to reach the rear face of the cell. The aim of this paper is to optimize and to analyze the MEC-P which was modified in order to make its industrial manufacturing easier. The distance between the solar cells and the diffuse reflector and the distance between the strip of solar cells affect the module performance. Such geometric parameters must be optimised considering the incident radiation on the rear face bifacial cells, as well as the module cost. To achieve this goal, a equation set was developed to determine the view factor between strip of solar cells and the reflector diffuse surface. The best thickness of the optical system and the best distance between the cell strips is 6 cm and 10 cm, respectively. The concentrator will have a total area of 60 cm x 120 cm. The MEC-P module cost is of US\$ 2,3 per watt, while the cheapest standard module found in the market is US\$ 3,3 per watt, resulting in a cost reduction of approximately 30%. The behaviour of the concentrator module and standard module is similar during the year.*

Keywords: *Solar energy, Static concentrator modules, Diffuse reflection.*