

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/239931564>

Análise de Módulos Fotovoltaicos Concentradores Estáticos em Fachadas

Article · January 2006

CITATION

1

READS

210

4 authors, including:



Izete Zanesco

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

54 PUBLICATIONS 226 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Adriano Moehlecke

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

55 PUBLICATIONS 205 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Tiago Cassol Severo

Universidade de Caxias do Sul (UCS)

12 PUBLICATIONS 7 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Projeto Gincarvi Jr - Desenvolvimento de foguetes amadores [View project](#)

Análise de Módulos Fotovoltaicos Concentradores Estáticos em Fachadas

**Izete Zanesco
Adriano Moehlecke
Márcia S. Pereira
Tiago C. Severo**

Resumo

Na última década o mercado de sistemas conectados à rede elétrica e integrados em fachadas de edificações tem crescido. Uma barreira para a penetração desta tecnologia em larga escala é o custo inicial da instalação do sistema. Uma forma de mitigar esta desvantagem é utilizar módulos fotovoltaicos concentradores estáticos. Neste trabalho, apresenta-se a otimização e a análise do módulo fotovoltaico concentrador estático PEC-44D projetado para fachadas de edificações. O sistema óptico linear foi projetado para células solares bifaciais. Os ângulos de aceitação θ_p e ξ foram otimizados, considerando uma fachada vertical (ângulo de inclinação de 90°) voltada ao norte. Para encontrar os ângulos de aceitação, foi realizada a simulação de um sistema fotovoltaico para 35 cidades brasileiras. Os ângulos de aceitação encontrados foram os mesmos para todos os lugares, sendo iguais a: $\theta_p = 0^\circ$ e $\xi = 90^\circ$. Visando aumentar a redução no custo deste tipo de módulos, foi analisado um sistema óptico alternativo com a seção transversal

Profa. Izete Zanesco, Prof. Adriano Moehlecke, Márcia S. Pereira e MSc. Tiago C. Severo

Centro Brasileiro para Desenvolvimento da Energia Solar Fotovoltaica – CB-Solar

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

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS

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

Telefone: 51 3320 3682 – Fax: 51 3320 3616 – E-mail: izete@pucrs.br

Apresentação Oral Tema: Fontes Renováveis de Energia Perspectiva: Tecnológica

constituída por uma semi-circunferência. Neste caso, a redução no custo varia em função da latitude de 12% a 36%. Um protótipo foi construído e instalado em uma fachada vertical voltada ao norte em Porto Alegre (latitude = - 30°). A análise dos resultados experimentais confirma os valores encontrados a partir das simulações.

1 - Introdução

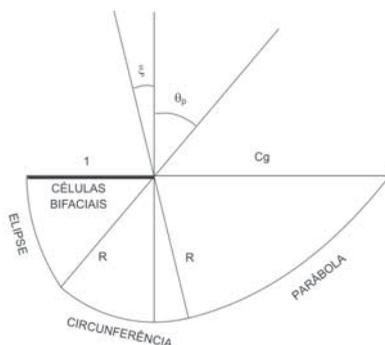
Em 2002, a potência instalada em sistemas fotovoltaicos era de 1300 Wp [1], a maior parte nos países industrializados, como um resultado dos programas governamentais de incentivo [2]-[9]. Para exemplificar, estima-se uma potência instalada de 4820 MWp em 2010 no Japão [1]. Na Alemanha, a instalação de sistemas fotovoltaicos integrados em edificações tem apresentado altas taxas de crescimento [2]. Neste tipo de instalações, os arquitetos têm desempenhado um papel importante no desenvolvimento de elementos estéticos e atrativos, agregando valor às edificações [3], [9]. Uma barreira que impede a rápida expansão deste tipo de sistema fotovoltaico é o elevado investimento inicial. Neste contexto, novos tipos de módulos fotovoltaicos foram desenvolvidos a partir da concentração da radiação solar sobre as células solares [10]-[15]. A radiação solar é concentrada sobre as células solares por meio de um sistema óptico de baixo custo, sem a necessidade de um sistema mecânico para seguir o movimento aparente do Sol. Conseqüentemente, podem ser instalados em fachadas de edificações.

O objetivo deste artigo é apresentar a otimização e a análise teórica e experimental do módulo fotovoltaico concentrador estático PEC-44D para fachadas de edificações no Brasil.

2 - O Módulo Fotovoltaico Concentrador Estático PEC-44D

O módulo estático PEC-44D está composto de um sistema óptico linear e células solares bifaciais. As células estão posicionadas no plano da abertura de entrada, com concentração da radiação solar somente na face posterior das mesmas, como ilustra a Figura 1. A seção transversal do sistema óptico é assimétrica, formada por parte de uma parábola, de uma circunferência e de uma elipse. O sistema óptico é desenhado a partir do ângulo de aceitação inferior (θ_p) e superior (ξ) [16]. O fator de concentração é maior no inverno que no verão, com a finalidade de compensar a variação da radiação solar em latitude médias e altas. Em conseqüência, a energia elétrica produzida é similar nas duas estações do ano e enquadra-se com a demanda energética dos usuários de sistemas fotovoltaicos autônomos. Este módulo foi projetado inicialmente para sistemas autônomos e neste trabalho é apresentada a otimização e análise, quando instalado em fachadas de edificações verticais e voltadas ao norte e o sistema é conectado à rede elétrica convencional.

Figura 1 - Seção transversal do módulo concentrador estático PEC-44D.



3 - Resultados das Simulações

3.1 - Irradiação Solar Horária

O método usado resume-se na simulação do sistema fotovoltaico a partir de uma base de dados de dez anos [17], considerando que a fachada possui um ângulo de inclinação de 90° e está voltada para o Equador. Para analisar a performance de módulos concentradores estáticos é necessário utilizar dados de irradiação horária. Portanto, gera-se uma seqüência de índices de transparência diários [18] para estimar a irradiação diária sobre uma superfície horizontal. Então, a irradiação diária é dividida em suas componentes direta e difusa. A partir desta última componente e da irradiação diária total estimam-se os valores da irradiação horária direta e difusa [19], [20]. A irradiação horária difusa sobre uma superfície inclinada é calculada utilizando o modelo de Perez [21]. A partir desta metodologia obtém-se a irradiação horária incidente na face frontal das células bifaciais.

A irradiância solar direta que incide na face posterior das células bifaciais é calculada a partir da concentração geométrica (C_g) e do fator de interceptação direcional [17]. Estes parâmetros são determinados pelos ângulos de aceitação e de inclinação. A irradiância difusa na face posterior das células solares é calculada utilizando um procedimento similar [17]. Neste caso, o fator de interceptação para a radiação solar refletida pelo solo e para cada uma das componentes da radiação difusa estabelecidas no modelo de Perez é determinado.

3.2 - Otimização do Sistema Óptico

A simulação do sistema fotovoltaico foi implementada para encontrar o custo do conjunto de módulos (ou painel fotovoltaico) normalizado em relação à energia elétrica diária média anual, como segue:

$$P_{GN} = \frac{P_{cell} + P_{con} (1 + C_g)}{\left(G_{df} + \frac{\eta_r}{\eta_f} G_{dr} \right) (1 + C_g) \eta_f} \quad (1)$$

onde P_{cell} e P_{con} são os preços por metro quadrado das células solares encapsuladas e do sistema óptico, respectivamente; $G_{\text{dr}}(\beta)$ e $G_{\text{dr}}(\beta)$ é a irradiação diária média anual na face frontal e posterior das células bifaciais, respectivamente; η_f é a eficiência total das células bifaciais na face frontal e η_r é a eficiência das células na face posterior, considerando as perdas ópticas.

O método de otimização foi aplicado para 35 cidades brasileiras para encontrar os ângulos de aceitação do módulo que resultam no menor valor do custo do conjunto de módulos, definido na Equação 1. Os resultados das simulações revelaram que os melhores ângulos de aceitação são os mesmos para todas as localidades: $\theta_p = 0^\circ$ e $\xi = 90^\circ$. Neste caso, a seção transversal do sistema óptico é composta por parte de uma elipse e parte de uma circunferência. O módulo foi denominado de PEC-FAC. Também se verificou que o melhor desempenho do módulo ocorre quando a face das células bifaciais com menor eficiência está voltada para o sistema óptico. Dois valores do preço por metro quadrado do sistema óptico foram avaliados: $P_{\text{con1}} = \text{R}\$115,00$ e $P_{\text{con2}} = \text{US}\$230,00$.

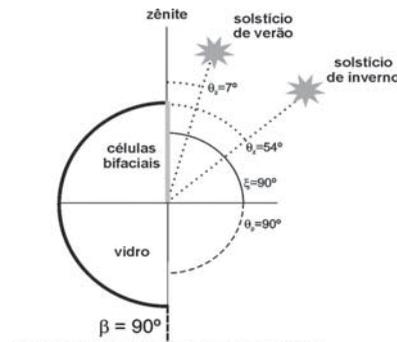
A simulação também foi aplicada para módulos convencionais planos para comparar a performance dos dois tipos de módulos. Para módulos convencionais, P_{GN} é obtido a partir de:

$$P_{\text{GN}} = \frac{P_{\text{cell}}}{G_{\text{dr}} \eta_f} \tag{2}$$

Após a comparação dos resultados constatou-se que para P_{con2} o custo do conjunto de módulos é similar para ambos tipos de módulos. Por outro lado, os resultados para P_{con1} mostram que a redução no custo é uma função da latitude, com valores que variam de 15% para baixas latitudes até 41% para latitudes médias ($\phi = -30^\circ$).

Um módulo com sistema óptico cujos ângulos de aceitação são de 90° foi analisado, com a finalidade de reduzir o custo da construção do sistema óptico. Neste dispositivo, denominado de PEC-FAL, a seção transversal do sistema óptico é uma semi-circunferência, como mostra a Figura 2. Comparando o módulo PEC-FAL com um módulo convencional, constata-se uma redução no custo variável entre 12% e 36%, aproximadamente 4% menor que os resultados para o módulo PEC-FAC. Em ambos casos, a redução no custo é sempre maior para maiores latitudes.

Figura 2 - Seção transversal do módulo PEC-FAL instalado na fachada de um edifício em Porto Alegre e constituindo um sistema conectado à rede elétrica.



Para comparar os módulos concentradores com convencionais de mesma área, calcula-se a irradiância correspondente aos módulos concentradores por meio de:

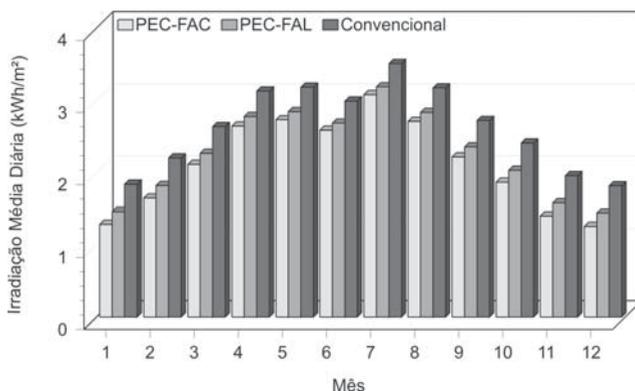
$$I_T = \left(\frac{1}{1+Cg} \right) I_F + \left(\frac{Cg}{1+Cg} \right) I_R \quad (3)$$

onde I_F e I_R é a irradiância incidente na face frontal e posterior das células bifaciais, respectivamente. Cabe comentar que as perdas ópticas são consideradas no cálculos de I_F e I_R .

3.3 - Resultados das Simulações

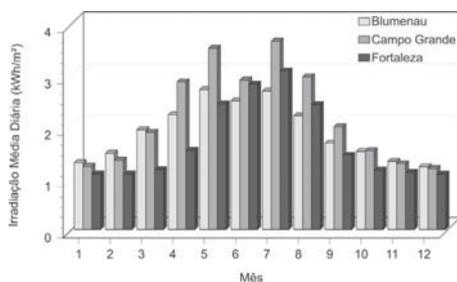
Na Figura 3 comparam-se os resultados simulados da irradiação diária média mensal correspondente aos módulos PEC-FAL, PEC-FAC e convencional, considerando-os instalados em Porto Alegre (latitude = -30°). Nota-se que a distribuição da irradiação incidente, a qual é proporcional a energia elétrica produzida, é similar para os três módulos. Portanto, conclui-se que o comportamento da energia elétrica média produzida ao longo do ano é similar nos três casos. Porém, para uma mesma área da superfície dos módulos a energia produzida pelo módulo convencional é maior, pois no caso dos concentradores ocorrem perdas ópticas, tais como reflexões no vidro e na superfície interna do sistema óptico.

Figura 3 - Irradiação diária média mensal para os módulos PEC-FAC, PEC-FAL e para um módulo convencional em Porto Alegre. Todos os módulos possuem um ângulo de inclinação de 90° e estão voltados ao norte.

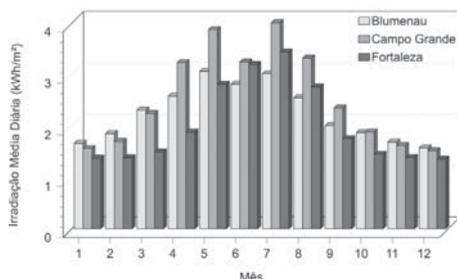


A mesma comparação foi implementada para as cidades de Blumenau ($\phi = -26,9^\circ$), Campo Grande ($\phi = -20,4^\circ$) e Fortaleza ($\phi = -3,7^\circ$) para analisar a performance dos dois tipos de módulos. Os resultados são apresentados na Figura 4. Observa-se o mesmo comportamento da irradiação correspondente aos módulos ao longo do ano, quando se compara a Figura 4-a com a Figura 4-b. Conforme esperado, para Campo Grande a irradiação é maior para ambos tipos de módulos.

Figura 4 - Irradiação diária média mensal para (a) o módulo PEC-FAL e (b) para um módulo convencional em Blumenau, Campo Grande e Fortaleza. Todos os módulos possuem um ângulo de inclinação de 90° e estão voltados ao norte.



(a)



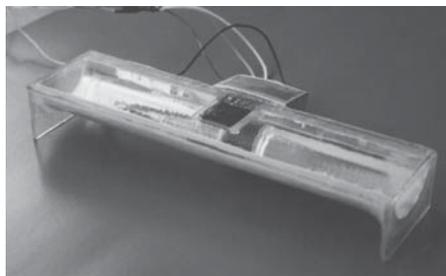
(b)

4 - Resultados Experimentais e Análise

4.1 - Fabricação do Protótipo

Um protótipo do módulo PEC-FAL foi construído e instalado em uma superfície inclinada de 90° e orientada ao norte, em Porto Alegre. Duas células solares monofaciais foram encapsuladas e associadas à resistores. A seguir, as células solares foram calibradas para medir independentemente a irradiância incidente em cada face das células bifaciais. A superfície interna do sistema óptico foi recoberta com um filme de prata, cuja refletância média é de 0,96. Então, as células encapsuladas foram associadas ao sistema óptico. Na Figura 5 ilustra-se o protótipo construído.

Figura 5 - Protótipo do módulo PEC-FAL.

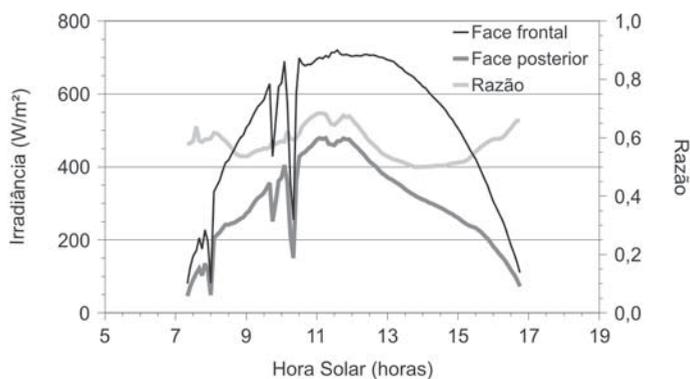


4.2 - Irradiância Incidente nas Células Bifaciais

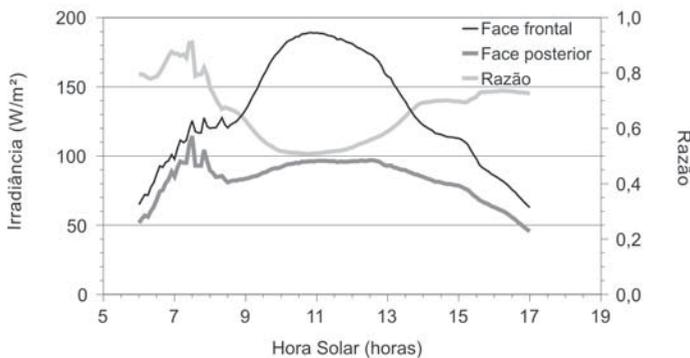
Um sistema de aquisição de dados automatizado foi implementado para monitorar o protótipo e armazenar uma base de dados. A irradiância em cada face das células bifaciais e a irradiância incidente no módulo estão sendo medidas a cada cinco minutos. A irradiância na superfície vertical está sendo medida com um piranômetro fotovoltaico.

Nas Figuras 6-a e 6-b apresenta-se a irradiância incidente em cada face das células bifaciais, durante um dia com céu sem nuvens próximo ao solstício de inverno e verão, respectivamente. Comparando estas duas figuras, observa-se que a irradiância em ambas faces das células é maior no inverno que no verão. No entanto, a razão entre a irradiância na face posterior e frontal é similar nas duas estações do ano. Esta razão é proporcional ao fator de concentração e este resultado é esperado para este sistema óptico. Também nota-se que nas primeiras horas do dia, na Figura 6-b, o fator de concentração aumenta, devido a maior quantidade de irradiância difusa.

Figura 6 - Irradiância em cada face das células bifaciais do módulo PEC-FAL em um dia próximo ao solstício de (a) inverno e (b) verão. Também é mostrada a razão entre a irradiância na face posterior e frontal.



(a)

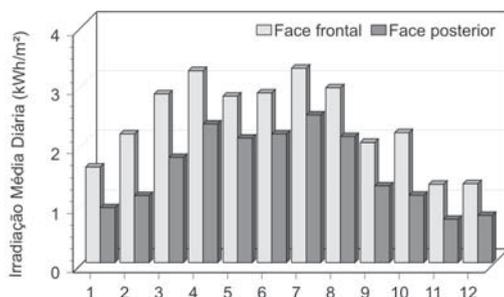


(b)

4.3 - Irradiação Diária

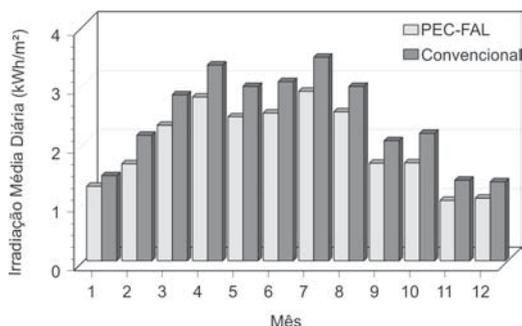
Para validar os resultados simulados, a irradiância medida foi integrada para determinar a irradiação diária. Os valores da irradiação em cada face das células bifaciais que constituem o módulo PEC-FAL são comparados na Figura 7. Como esperado, a irradiação incidente na face posterior das células é menor durante todas as estações do ano, devido as perdas ópticas.

Figura 7 - Irradiação diária média mensal incidente na face frontal e posterior das células bifaciais acopladas ao módulo PEC-FAL. O protótipo está sendo caracterizado experimentalmente em Porto Alegre.



Na Figura 8 comparam-se os resultados experimentais da irradiação diária correspondente ao módulo PEC-FAL com a irradiância incidente em um módulo convencional. Neste caso, se a área dos dois for a mesma, então a irradiância é proporcional a energia elétrica produzida pelos módulos. Novamente, observa-se que o comportamento da energia elétrica produzida ao longo do ano é similar para os dois módulos, confirmando os resultados simulados e apresentados na Figura 3. Também nota-se que o módulo convencional produz mais energia em todas as épocas do ano, pois no módulo concentrador ocorrem perdas ópticas.

Figura 8 - Irradiação diária média mensal medida com o módulo PEC-FAL e com um módulo convencional em Porto Alegre.



5 - Conclusões

O módulo concentrador estático PEC-44D foi otimizado para fachadas que constituem um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica convencional. A seção transversal do sistema óptico é formada por parte de uma circunferência e parte de uma elipse. Um módulo alternativo, denominado de PEC-FAL, com seção transversal do sistema óptico formada por uma semi-circunferência foi proposto e analisado. Os dois tipos de módulos foram comparados e constatou-se que a performance ao longo do ano é similar. No entanto, a redução no custo proporcionada pelo módulo PEC-FAL é somente 4% menor que no caso do módulo PEC-FAC. Comparações do módulo PEC-FAL com um módulo convencional mostram que a redução no custo varia de 12% para baixas latitudes até 36% para latitudes médias. Um protótipo foi construído e a caracterização experimental confirmou o comportamento simulado. Portanto, concluiu-se que o módulo PEC-FAL pode ser uma alternativa para reduzir o custo de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica e instalado em uma fachada voltada ao norte.

6 - Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro e bolsas de estudo proporcionadas pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e pela FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul).

7 - Referências Bibliográficas

- [1] OHNO, J. Examples of successful architectural integration of PV: Japan. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol.12, Nº 6, 2004, pp. 471- 476.
- [2] HAGEMANN, I.B., Examples of successful architectural integration of PV: Germany *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol.12, 2004, pp. 461-470.
- [3] KAAAN, H., REIJENGA, T.. Photovoltaics in an architectural context. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* , Vol.12, 2004, pp. 395-408.
- [4] PRASAD, D. K., SNOW, M.. Examples of successful architectural integration of PV: Australia. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol.12, 2004, pp. 477-483.
- [5] From tax haven to PV, *Photon International*, dezembro 2003, p. 22.
- [6] Party time for Chinese PV? *Photon International*, Janeiro 2004, p. 32.
- [7] A will but not a way. *Photon International*, outubro 2004, p. 34.
- [8] Solar for big roofs. *Photon International*, setembro 2004, p. 18.
- [9] Photovoltaic as a status symbol. *Photon International*, setembro 2003, p. 24.
- [10] RABINOWITZ, M., DAVIDSON, M.. Electronic film with embedded micro-mirrors for solar energy concentrator systems. *Solar Energy*, Vol. 77, Nº. 1, 2004, pp. 3-13.
- [11] MOEHLECKE, A., ZANESCO, I., PAN, A. C., SEVERO, T. C., MALLMAN, A.P.. Photovoltaic module with coloured diffuse reflectors. *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Munique, 2001, pp. 785-787.
- [12] MOHEDANO, R., BENÍTEZ, P., MIÑANO, J. C.. Cost reduction of building integrated PV's via static concentration systems. *Proceedings of the 2nd World Conference*

- and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, Viena, 1998, pp. 2241-2244.
- [13] BOWDEN, S., WENHAM, S. R., GREEN, M. A. Application of static concentrators to photovoltaic roof tiles. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 3, 1995, pp. 431- 423.
- [14] MAYREGGER, B., AUER, R., NIEMANN, M., ABERLE, A.G., HEZEL, R.. Performance of a low-cost static concentrator with bifacial solar cells. *Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Nice, 1995, pp. 2377-2380.
- [15] BROGEN, M., KARLSSON, B., HAKANSSON, H.. Design and modeling of low-concentrating photovoltaic solar energy systems and investigation of irradiation distribution on modules in such systems. *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Munique, 2001, pp. 2657-2660.
- [16] ZANESCO, I., LORENZO, E.. Experimental performance of the static concentrator PEC-44D. *Proceedings of the 13th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Nice, 1995, pp. 2402-2405.
- [17] ZANESCO, I., LORENZO, E.. Optimisation of an asymmetric static concentrator: the PEC44-D. *Progress in Photovoltaics*, Vol. 10, 2002, pp. 361-376.
- [18] AGUIAR, R. J., COLLARES-PEREIRA, M., CONDE, J. P.. Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition matrices. *Solar Energy*, Vol. 40, N° 3, 1988, pp. 269-279.
- [19] DUFFIE, J. A. e BECKMAN, W.. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley, Nova York, 1980.
- [20] IQBAL, M.. *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, Nova York, 1983.
- [21] PEREZ, R., SEALS, R., INEICHEN, P., STEWARD, R., MENICUCCI, D.. A new simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, Vol. 39, N°3, 1987, pp. 221-231.