

POTENCIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONCENTRADORES NO BRASIL

Trajano de Souza Viana^{1,2} – trajano@labeee.ufsc.br

Jair Urbanetz Junior^{1,3} – jair@labeee.ufsc.br

Ricardo Rüther^{1,2} – ruther@mbox1.ufsc.br

¹LabEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - ²LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

³Departamento de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

3.6 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

Resumo: A utilização e avaliação do desempenho de sistemas fotovoltaicos concentradores (SFVC) tem aumentado nos últimos anos, principalmente em regiões com alta incidência de radiação direta de países como Espanha e Estados Unidos. No Brasil predominam os estudos de sistemas fotovoltaicos com módulos planos, sem concentrador, mas o país apresenta muitas regiões com alta incidência de radiação direta, nas quais a irradiação direta normal anual pode chegar a valores superiores aos de irradiação global ou inclinada. O aproveitamento do potencial energético da irradiação direta normal (IDN) implica na utilização de sistemas fotovoltaicos com rastreamento do Sol. O estudo do desempenho de tais sistemas apresenta como principal dificuldade a baixa disponibilidade de dados de irradiação direta normal para o território brasileiro. Com base em dados da estação solarimétrica do LABSOLAR, localizado na UFSC, em Florianópolis, executou-se um estudo preliminar, para avaliar o potencial da geração de sistemas fotovoltaicos concentradores, comparado com a geração de um sistema plano que opera no mesmo local. Os resultados, embora não promissores para Florianópolis, são preliminares e localizados, e não excluem a possibilidade do emprego de sistemas concentradores em outras regiões do Brasil. É necessário ampliar a base de dados de irradiação direta normal, principalmente para as regiões potencialmente promissoras, e instalar sistemas piloto nessas regiões para realização de estudos e efetiva avaliação do desempenho.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos Concentradores (SFVC), Irradiação Direta Normal (IDN), Concentradores.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Concentradores

Os sistemas fotovoltaicos (SFV) podem ser classificados em dois grupos, com relação ao modo como é utilizada a radiação solar: sem concentrador e com concentrador. Os sistemas sem concentrador utilizam a radiação solar de forma natural, tal como chega à superfície das células fotovoltaicas. Nos sistemas com concentrador a radiação é coletada com o auxílio de dispositivos específicos e é focalizada sobre a superfície das células fotovoltaicas, que apresentam área bastante reduzida quando comparada com a área das células dos sistemas sem concentrador. Os sistemas fotovoltaicos concentradores (SFVC) podem utilizar dois tipos de concentrador: concentrador não formador de imagem e concentrador formador de imagem.

O concentrador não formador de imagem é um sistema estático, que utiliza as radiações direta e difusa. Este tipo de concentrador apresenta baixo fator de concentração e pode ter o rendimento aumentado com a utilização de células bifaciais, apresentando geração anual superior aos módulos planos convencionais (Severo, 2005).

O concentrador formador de imagem só opera se os raios luminosos incidentes forem paralelos, pois apenas a radiação direta normal pode ser concentrada. Deste modo, o concentrador deve ser apontado continuamente para o Sol, tornando-se necessário o emprego de um sistema de rastreamento do Sol (*tracking system*) durante a sua trajetória aparente diária e anual. Este tipo de concentrador pode apresentar elevado fator de concentração, da ordem de 1000 vezes (1000X) ou mais. Os elementos concentradores podem ser parabólicos reflexivos ou lentes Fresnel e, quando integrados com as células, formam o módulo fotovoltaico concentrador¹ (MFVC).

1.2. Células e módulo fotovoltaico concentrador

A maior parte dos sistemas fotovoltaicos emprega módulos convencionais planos, sem concentrador, sendo que em torno de 85% desses sistemas utilizam módulos constituídos por células de silício cristalino de junção simples. A outra parcela dos sistemas utiliza módulos com células de filme fino baseadas no silício não cristalino (e. g. silício amorfo) e em outros materiais, tais como telúrio e cádmio (CdTe) ou cobre, índio, gálio e selênio (CIS e CIGS).

¹ Módulo fotovoltaico concentrador é definido como “dispositivo constituído por células solares integradas a um concentrador solar” na norma ABNT NBR 10899:2006.

As células de silício cristalino apresentam eficiência na faixa de 14 a 19% e as de filme fino, de silício não cristalino e outros materiais, apresentam eficiência na faixa de 6 a 18% (Maycock, Bradford, 2007). O uso de dispositivos para concentrar a radiação solar tem como objetivo reduzir a área das células, cujo custo é elevado, visando à redução do custo dos sistemas fotovoltaicos e o aumento da competitividade entre a energia fotogerada e a geração convencional.

A geração fotovoltaica com concentrador passou, nos últimos anos, a atrair mais atenção de entidades de pesquisa e indústrias e está, atualmente, passando da fase de estudo de desempenho de protótipos para a comercialização (Bett, Dimroth *et al.*, 2004), (Lerchenmüller, Bett *et al.*, 2005), (Lerchenmüller, Hakenjos *et al.*, 2007). Empresas que produzem células, módulos e sistemas fotovoltaicos concentradores têm fornecido sistemas para instalações com potência da ordem de megawatt (MW), em projetos destinados a avaliar e comparar o desempenho de sistemas fotovoltaicos concentradores (Verlinden *et al.*, 2008). Dentre esses projetos, destaca-se o projeto do ISFOC, Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentração (*Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración*) na Espanha, com a instalação de 3MW de SFVC.

O ISFOC tem como objetivos lançar a tecnologia dos concentradores fotovoltaicos, em nível mundial, e tornar-se um centro de referência em pesquisa e desenvolvimento (P&D), formando pesquisadores e mão de obra qualificada para trabalhar com esta tecnologia (Rubio, 2007), (Rubio *et al.*, 2008).

Os concentradores formadores de imagem, com fator de concentração de 500X ou mais, empregam células fotovoltaicas multijunção (junção dupla ou tripla), não baseadas no silício, tais como as de GaInP/GaInAs ou AsInP/GaAs/Ge. Estas células quando expostas a radiação solar concentrada, apresentam eficiência na faixa de 31 a 39%, ou seja, cerca de duas vezes maior que as de silício (Bett *et al.*, 2008), (Kreith, Goswami, 2007).

Concentradores com fator menor que 500X podem empregar células especiais baseadas no silício (Bett, Dimroth *et al.*, 2004). A eficiência de células multijunção varia com a concentração, como exemplificado na Fig. 1 para a célula de junção tripla (InGaP/InGaAs/Ge) T1000, fabricada pela *EMCORE Corporation* (Emcore, 2006).

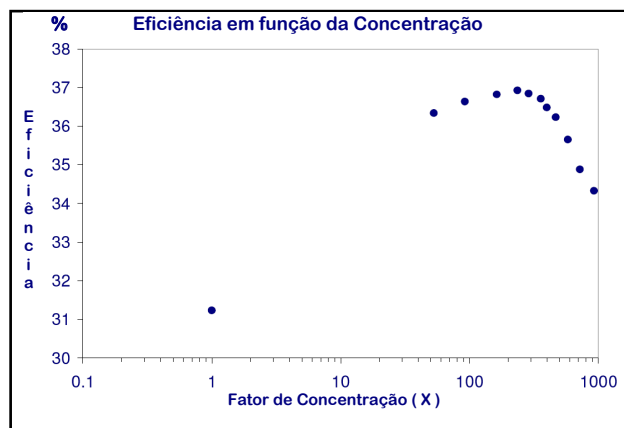


Figura 1 - Eficiência de uma célula em função da concentração, para a célula Emcore T1000 de junção tripla (InGaP/InGaAs/Ge). (Fonte: Emcore)

A Fig. 2 ilustra um tipo de módulo fotovoltaico concentrador, que utiliza lentes Fresnel como elemento para concentrar a radiação direta e refrigeração passiva por meio de dissipador de calor. Este MFVC é produzido pela empresa Sunrgi (<http://www.sunrgi.com/downloads.html>).

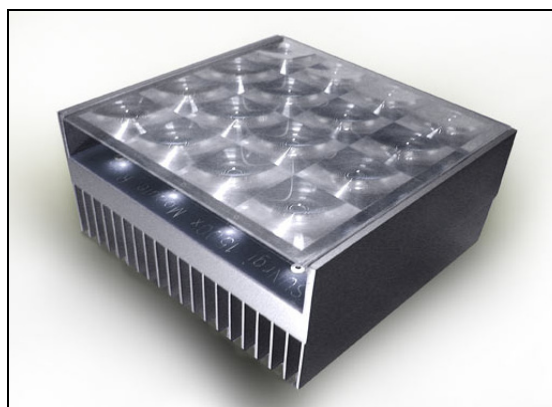


Figura 2 – Módulo fotovoltaico concentrador (MFVC), com lente Fresnel e dissipador de calor para refrigeração passiva. (Fonte: Sunrgi)

1.3. Radiação solar

Além dos diversos aspectos tecnológicos a serem considerados para a utilização de sistemas fotovoltaicos concentradores, do tipo formador de imagem, é imprescindível a obtenção de dados confiáveis de irradiância direta normal e de irradiação direta normal (IDN), para avaliar a quantidade de energia solar que incide perpendicularmente sobre o módulo concentrador.

A partir dos dados de IDN pode-se estimar o potencial de determinado local e avaliar a geração e o desempenho de sistemas fotovoltaicos concentradores. No entanto, apesar de tais dados estarem disponíveis em algumas estações solarimétricas, não são ainda disponíveis de forma ampla para todo o território brasileiro.

Os Atlas solarimétricos publicados até recentemente não apresentavam dados numéricos ou mapas mostrando a distribuição da irradiação direta normal (IDN) no território brasileiro. A partir do Projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*), desenvolvido pelo Programa das Nações Unidas para o Ambiente (UNEP, *United Nations Environment Programme* - <http://swera.unep.net/swera>) foi possível a obtenção de dados de radiação mais abrangentes para o Brasil. No entanto, dados de irradiação direta normal são ainda reduzidos e o mapa disponível, mostrado na Fig. 3, apresenta a distribuição da irradiação direta normal, por faixas de valores da média anual, o que não permite a obtenção dos valores específicos de irradiação para determinado local desejado.

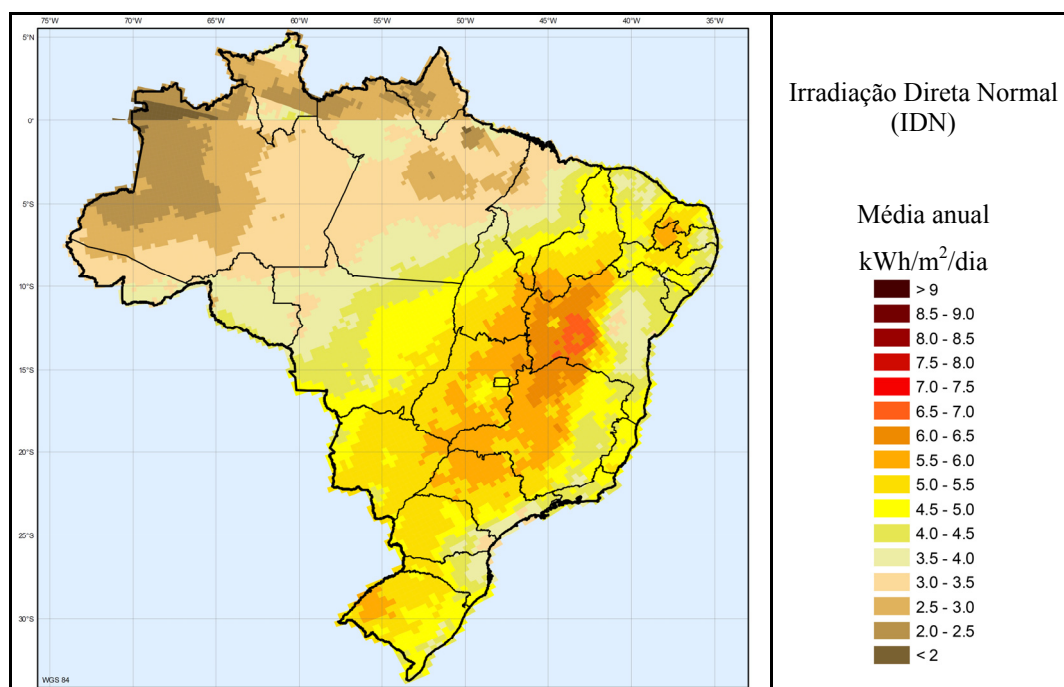


Figura 3 – Mapa com faixas de valores de irradiação direta normal (IDN) para o território brasileiro. (Fonte: Adaptado de http://swera.unep.net/typo3conf/ext/metadata_tool/archive/browse/344.pdf)

2. METODOLOGIA

Este artigo apresenta uma estimativa do potencial de geração de energia elétrica de um sistema fotovoltaico concentrador, para a cidade de Florianópolis, e o potencial de radiação solar para as capitais brasileiras.

O SFVC considerado nesta estimativa possui potência nominal de 10,8kWp, área de 43,9m² e eficiência de 21,1%. Este sistema é baseado nos dados do desempenho do sistema de 32,2kWp, com área de 130m², que utiliza células multi-junção III-V, ótica reflexiva parabólica e rastreamento do Sol, descrito em Verlinden *et al.* (2008).

O valor da energia gerada durante o ano de 2006 pelo sistema FV plano de 10,8kWp, instalado no Centro de Cultura e Eventos da UFSC, é utilizado para comparar com a estimativa de geração do SFVC de mesma potência nominal, descrito anteriormente.

A radiação solar global é composta pela radiação direta e pela radiação difusa. A radiação direta normal é a componente de maior interesse quando se utilizam concentradores com dispositivos de rastreamento do Sol. Os dados de irradiância normal direta do ano de 2006, obtidos no Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), serviram de base para estimativa do potencial de geração para Florianópolis. O LABSOLAR possui equipamento para a medição de dados solarimétricos e climatológicos, e registra dados com intervalo de 1 minuto.

Dados de irradiação direta normal, obtidos do projeto SWERA, foram utilizados no levantamento dos perfis de irradiação para as capitais brasileiras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Irradiação solar para as capitais brasileiras

A Fig. 4 mostra gráficos de barras, traçados a partir de dados do Projeto SWERA, com os valores das médias mensais do total diário de irradiação difusa, direta normal, global horizontal e global inclinada, para todas as capitais brasileiras. As cidades de Campo Grande, Belo Horizonte, Goiânia e Brasília destacam-se pelos altos valores de irradiação direta normal, que em muitos meses é maior do que os valores de irradiação global inclinada. Os valores de irradiação mostrados permitem verificar as diferentes possibilidades de aproveitamento da radiação solar, observando-se qual a parcela de radiação solar predominante para cada cidade.

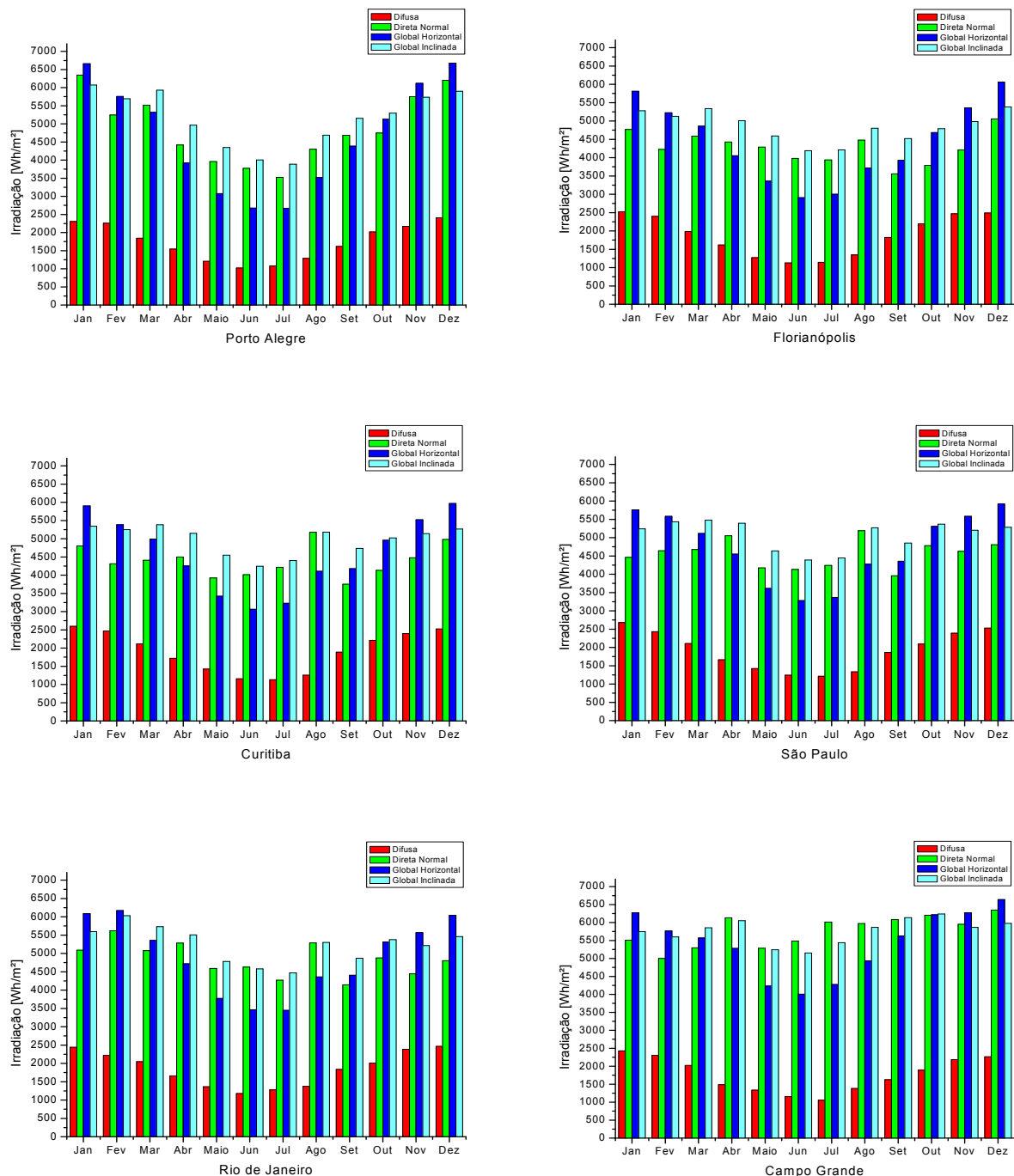


Figura 4 - Valores das médias mensais do total diário de irradiação difusa, direta normal, global horizontal e global inclinada para as capitais brasileiras.

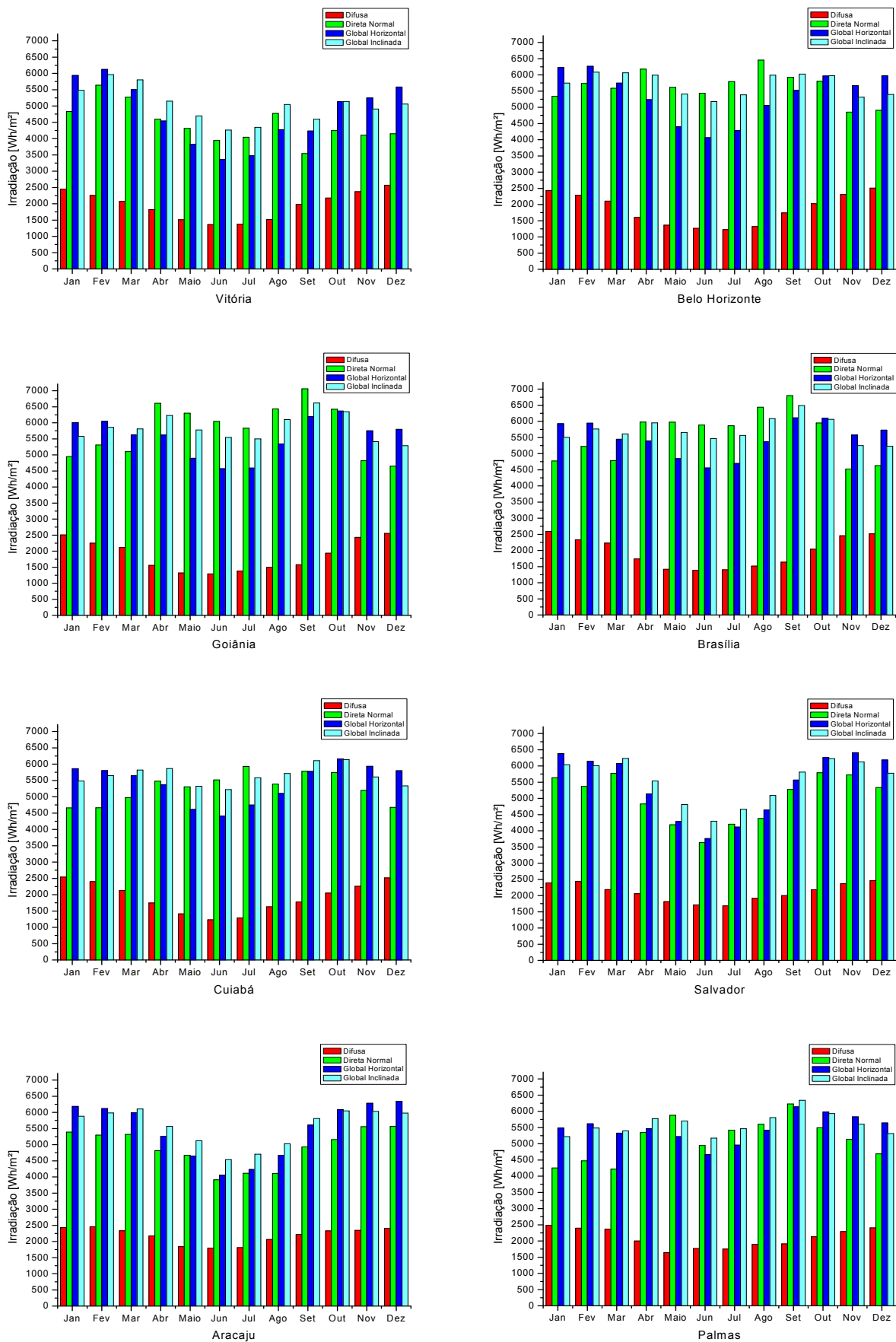


Figura 4 (cont.) - Valores das médias mensais do total diário de irradiação difusa, direta normal, global horizontal e global inclinada para as capitais brasileiras.

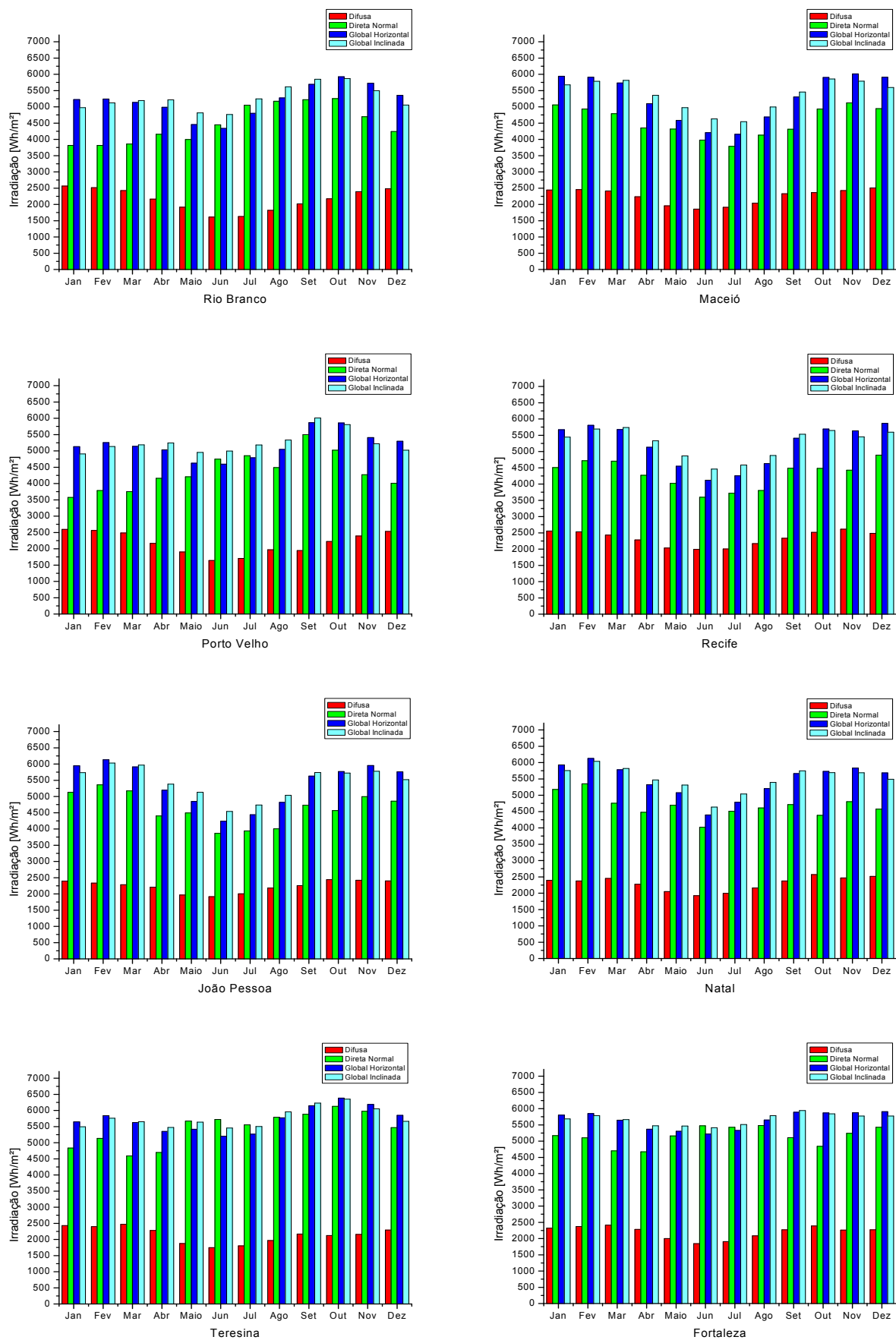


Figura 4 (cont.) - Valores das médias mensais do total diário de irradiação difusa, direta normal, global horizontal e global inclinada para as capitais brasileiras.

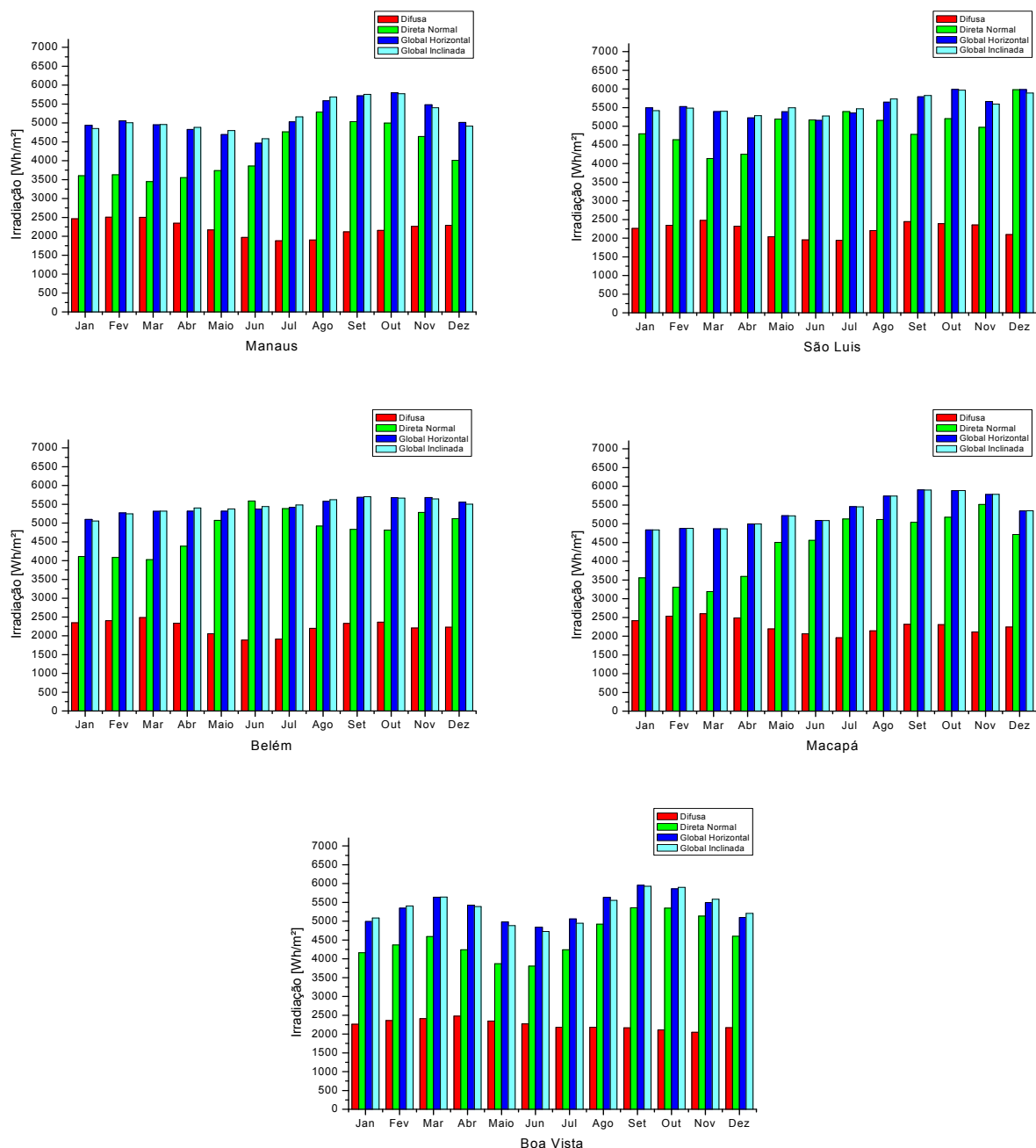


Figura 4 (cont.) - Valores das médias mensais do total diário de irradiação difusa, direta normal, global horizontal e global inclinada para as capitais brasileiras.

3.2 Geração de um sistema FV plano, instalado em Florianópolis

Desde julho de 2004 encontra-se em operação no prédio do Centro de Cultura e Eventos da UFSC, um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFVCR), com potência instalada de 10,8kWp. O sistema utiliza módulos planos, de silício amorfo (a-Si), que foram instalados em julho de 2003 e permaneceram expostos à radiação solar durante um ano, em circuito aberto. Os módulos já estavam estabilizados quando, em julho de 2004, foram instalados os inversores, cuja aquisição atrasou devido à dependência de verbas. Este SFVCR, descrito em Viana e Rüther (2007), gerou 55,2MWh em quatro anos de operação. A Tab. 1 mostra dados de geração do sistema por ano calendário e a produtividade (*Yield*).

Tabela 1. Geração e produtividade (*Yield*) do SFVCR de 10,8kWp instalado na UFSC.

ANO	Energia gerada (kWh)	Produtividade (<i>Yield</i>) (kWh/kWp)
2005	13.460	1.237
2006	14.505	1.333
2007	13.613	1.251

O valor da energia gerada pelo sistema no ano de 2006, igual a 14.505kWh, foi utilizado como base para avaliar e comparar o potencial de geração de um sistema fotovoltaico concentrador (SFVC) em Florianópolis.

A Fig. 5 mostra o acompanhamento da geração do referido sistema ao longo do período de quatro anos de operação.

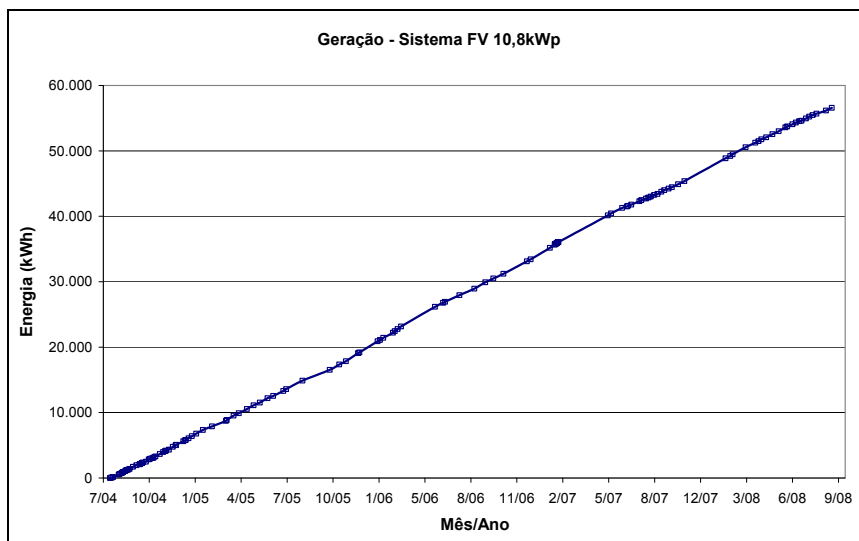


Figura 5 - Energia gerada pelo sistema fotovoltaico, de 10,8kWp, instalado na UFSC.

3.3 Estimativa do potencial de geração com um SFVC, em Florianópolis

Este trabalho foi baseado no sistema fotovoltaico concentrador descrito por Verlinden *et al.* (2008) que possui eficiência de 21,1%.

Com os dados de irradiância direta normal, registrados pelo LABSOLAR em Florianópolis, obteve-se para o ano de 2006 o valor de 3,71kWh/m²/dia para a média anual do total diário da irradiação direta normal.

Um SFVC com potência de 10,8kWp, equivalente à potência do sistema fotovoltaico plano instalado na UFSC, ocuparia uma área de 43,9m² e teria geração estimada em 12.550kWh para o ano de 2006. Este valor estimado representa 86,5% da energia gerada (14.505kWh) pelo sistema fotovoltaico plano de referência.

As Figs. 6 e 7 mostram gráficos de irradiância para dois dias, dos meses de junho e dezembro de 2006, escolhidos para representar um dia limpo (com pouca cobertura de nuvens) e um dia ruim (instável e nublado).

A Fig. 6 apresenta curvas de irradiância direta normal e global inclinada para 27°, para um dia limpo (01/06/2006) e um dia ruim (08/06/2006). O dia 01 apresentou irradiação direta normal igual a 7,27 kWh/m² e irradiação global inclinada igual a 6,12 kWh/m² e o dia 08 apresentou os valores de 3,20 kWh/m² e 4 kWh/m² respectivamente.

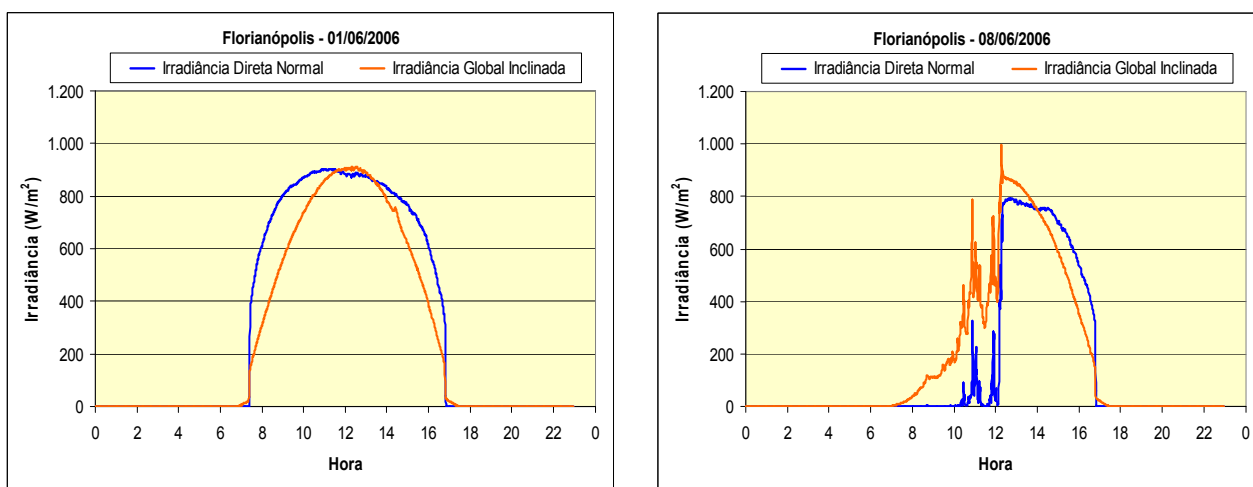


Figura 6 – Gráficos de irradiância direta normal e global inclinada (27°) nos dias 01 e 08 de junho de 2006.

A Fig. 7 apresenta curvas de irradiância direta normal e global inclinada para 27°, para um dia limpo (28/12/2006) e um dia ruim (15/12/2006). O dia 28 apresentou irradiação direta normal igual a 8,98kWh/m² e irradiação global inclinada igual a 7,21kWh/m² e o dia 15 apresentou os valores de 1,71kWh/m² e 6,58kWh/m² respectivamente.

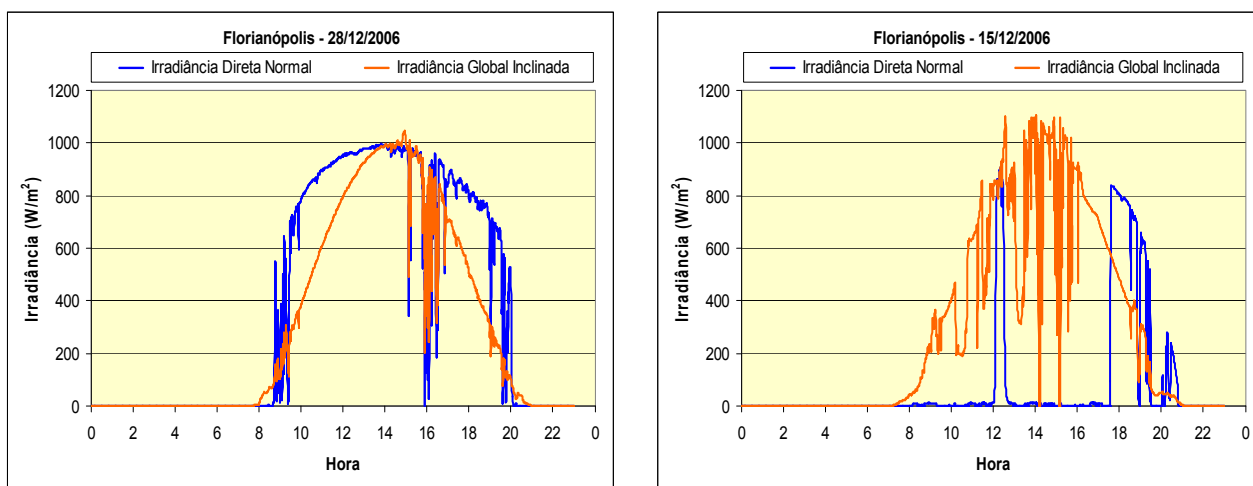


Figura 7 – Gráficos de irradiância direta normal e global inclinada (27°) nos dias 28 e 15/12/06.

Os valores de irradiação obtidos nos dias apresentados nas Fig. 6 e 7 mostram que os valores de irradiação direta normal podem ser superiores aos de irradiação global inclinada, em dias limpos ou com pouca cobertura de nuvens, o que poderia levar a geração do SFVC a ser superior à geração do sistema fotovoltaico plano. Nos dias nublados a situação se apresenta de forma oposta, levando a geração do sistema plano a valores superiores aos do SFVC.

4. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados, baseados nos dados obtidos pela estação solarimétrica do LABSOLAR, no SFVC descrito por Verlinden *et al.* (2008) e na geração do sistema plano de 10,8kWp instalado na UFSC, apontam para um desempenho energético de sistemas fotovoltaicos concentradores menor do que o de sistemas planos, em Florianópolis. A expansão detalhada desse estudo, para outras regiões brasileiras implica na obtenção de dados históricos confiáveis de irradiância direta normal, os quais não são ainda amplamente disponíveis. As faixas de valores de irradiação direta normal, apresentadas no mapa na Fig.1, e os valores apresentados nos gráficos da Fig. 4, já indicam as localidades no Brasil onde os sistemas fotovoltaicos concentradores tenderiam a apresentar melhor desempenho. No entanto, é necessário ampliar a base de dados de irradiação direta normal e instalar sistemas fotovoltaicos concentradores e planos, monitorados com sistemas de aquisição de dados, principalmente em regiões potencialmente promissoras visando realizar estudos para efetiva avaliação e comparação do desempenho energético e operacional das duas tecnologias.

REFERÊNCIAS

- Bett, A. W., Dimroth, S. W. *et al.*, 2004. FLATCON and FLASHCON Concepts for High Concentration PV, 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France.
- Bett, A. W., Jaus, J. *et al.*, 2008. Outdoor Evaluation of FLATCON Modules and Systems, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, USA.
- Emcore, 2006. T1000 Cell - Triple-Junction High-Efficiency Solar Cells for Terrestrial Concentrated Photovoltaic Applications. Disponível em <www.emcore.com>
- Kreith, F. and Goswami, D. Y. (Eds.), 2007. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy, Boca Raton, CRC Press.
- Lerchenmüller, H., Bett, A. W. *et al.*, 2005. Cost and Market Perspectives for FLATCON Systems, ISCC-3, International Solar Conference for the Generation of Electricity and Hydrogen, Arizona, USA.
- Lerchenmüller, H., Hakenjos, A. *et al.*, 2007. From FLATCON Pilot Systems to the first Power Plant, ICSC-4, International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity and Hydrogen, El Escorial, Spain.
- Maycock, P. and Bradford, T., 2007. PV Technology, Performance, and Cost - 2007 Update, Massachusetts Prometheus Institute for Sustainable Development and PV Energy Systems.
- Rubio, F., 2007. Energía Solar Fotovoltaica de Concentración, Jornadas "Energías Renovables y Cambio Climático", Cáceres, España.
- Rubio, F., Martinez, M., *et al.*, 2008. Deploying CPV Power Plants - ISFOC Experiences, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, USA.

- Verlinden, P. J., Lewandowski *et al.*, 2008. Update on two-year Performance of 120kWp Concentrator PV Systems Using Multi-junction III-V Solar Cells and Parabolic Dish Reflective Optics, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, USA.
- Viana, T. S. e Rüther, R., 2007. Análise do desempenho de um sistema fotovoltaico de 10 kWp conectado à rede elétrica, I CBENS, I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, Brasil.
- Severo, T. C., 2005. Desenvolvimento do Módulo Fotovoltaico Concentrador Estático HELIUS para Sistemas Autônomos, Dissertação de Mestrado, PGETEMA, PUC-RS, Porto Alegre.

POTENTIAL OF CONCENTRATOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN BRAZIL

Abstract. *The use and performance evaluation of concentrator photovoltaic systems has increased in the last years, mainly in regions with high levels of direct normal irradiation (DNI) in countries as Spain and United States. In Brazil predominate studies of photovoltaic systems with flat modules, without concentrator, but the country presents many regions with high incidence of direct radiation, where the annual normal direct irradiation can achieve values over global or tilted irradiation. The use of this energetic potential from direct normal irradiation (DNI) implies in the utilization of photovoltaic systems with a sun tracking device. Performance study of such systems presents as main difficulty the low availability of DNI data for Brazilian territory. Based on data from LABSOLAR solarimetric station, located in the UFSC, Florianópolis, we performed a preliminary study to evaluate the electricity generation potential of concentrator photovoltaic systems, compared with generation from a flat module system that operates in the same place. Results, although not promising for Florianópolis, are preliminary and for a specific place, and do not exclude the possibility of using CPVS in other Brazilian regions. It is necessary to enlarge Brazil DNI data base and conduct more studies deploying flat module and concentrator module pilot systems in potentially promising regions, for effective comparison and performance evaluation of these technologies.*

Key words: *Concentrator Photovoltaic Systems (CPVS), Direct Normal Irradiation (DNI), Concentrators.*