

AVALIAÇÃO DA ENERGIA GERADA POR UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 10 kW_p COM RAZÃO DE CONCENTRAÇÃO DE 1000 SÓIS INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA

O. C. Vilela¹, B. H. Botler¹, F. J. B. Uribe, E. M. S.

Barbosa, N. Fraidenraich

Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Energia Nuclear
Grupo em Fontes Renováveis de Energia (FAE)
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 – CDU Recife PE Brasil – CEP: 50.740.540
e-mail: ocv@ufpe.br

Recibido 13/08/14, aceptado 25/09/14

RESUMEN: Este trabajo busca analizar las características de operación de un Generador Fotovoltaico de Alta Concentración (HCPV – High Concentration Photovoltaics) de 10 kW_p con una concentración de 1000 soles instalado en el área externa del Departamento de Energía Nuclear de la Universidad Federal de Pernambuco. Después de la instalación del sistema fotovoltaico (FV), fueron colectados en conjunto los datos de la generación y del consumo de energía eléctrica del departamento. Fueron estimados los valores de la irradiancia directa incidente en el plano del generador hora a hora para el día más representativo de cada mes, utilizando correlaciones disponibles en la literatura. A partir de los resultados experimentales y de las simulaciones realizadas fue posible establecer una relación entre la oferta y la demanda de energía, llegando a la conclusión que el generador FV, en las mejores condiciones de funcionamiento, consigue suministrar aproximadamente 14% del consumo eléctrico del departamento, lo que es equivalente al gasto de iluminación de la edificación.

Palabras clave: Energía solar, Alta concentración, conversión fotovoltaica, sistemas conectados a la red, Células multiunión

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, algumas iniciativas governamentais visando a inserção de fontes renováveis na matriz energética brasileira têm impulsionado várias ações que favorecem o desenvolvimento das pesquisas e aplicações da geração solar fotovoltaica. Em particular, a Normativa N° 482 (ANEEL, 2012), que estabelece as condições para o acesso de micro e minigeração aos sistemas de distribuição de energia elétrica, beneficia fortemente o setor de fotovoltaicos, regulamentando as instalações e imprimindo confiabilidade aos sistemas instalados.

Em termos de tecnologia fotovoltaica, os módulos com células de silício cristalino têm sido ao longo de várias décadas a opção mais favorável técnica e economicamente para compor as instalações fotovoltaicas (FV), tanto em aplicações residenciais como comerciais (centrais de geração de potência). Entretanto, ao longo de vários anos, diferentes alternativas vêm sendo estudadas na tentativa de reduzir custos e aumentar o rendimento dos sistemas.

Os sistemas FV com alta concentração (HCPV) utilizando lentes de Fresnel para concentrar a luz solar sobre pequenas células de alta eficiência (Multi-junção) (Pérez-Higueras *et al*, 2011), apresentam-se como uma opção para substituir os conversores FV convencionais, incrementando a eficiência global do sistema (Fernández *et al*, 2012). Os módulos HCPV usam uma quantidade menor de células FV quando comparados aos módulos de silício e, portanto, usam menos materiais custosos e tóxicos que os sistemas convencionais. O objetivo final proposto pelos sistemas HCPV, é reduzir o custo da eletricidade produzida através da substituição da área de célula utilizada (material custoso) utilizando sistemas óticos mais econômicos (lentes ou espelhos) (Pérez-Higueras *et al*, 2011). Outra vantagem dos sistemas HCPV é o grande potencial de reciclagem, quando comparado com módulos FV convencionais, pois apresentam maiores quantidades de vidro e metal.

As células solares usadas nos módulos HCPV são as de multi-junção (MJ). A alta eficiência da célula de MJ se dá pelo fato de cada camada da célula interagir com diferentes trechos do espectro eletromagnético da radiação solar (Chen, 2002). O recorde de eficiência atualmente é de 44.7%, e foi atingido por uma célula de quatro camadas com 5,2mm² de área, com um espectro AM1,5D sob 297 sóis a 25°C (Fraunhofer, 2013). Os bons resultados relatados foram obtidos em laboratório, com condições específicas de espectro, irradiância e temperatura. Contudo, ensaios outdoor têm sido realizados fornecendo informações relevantes que podem ser usadas para determinar o comportamento da célula operando em condições reais (Vilela, 2013).

Neste trabalho foram estudadas as principais características de geração de um sistema HCPV instalado e interligado à rede elétrica do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da UFPE. Foi realizada uma análise da energia incidente no sistema, na forma de radiação solar, de energia gerada em corrente contínua (CC), e da energia transformada (CA). O consumo de energia elétrica do DEN foi estimado por meio de uma análise minuciosa de todos os equipamentos elétricos utilizados no DEN e comparado com medições feitas na subestação do departamento.

O trabalho realizado pretende atingir os seguintes objetivos:

- Obter o perfil de demanda energética do DEN, identificando os horários de maior consumo, os equipamentos que são responsáveis pela maior demanda de energia, quantificar e qualificar a energia necessária para a operação do departamento.- Analisar a energia solar disponível no departamento e como esse recurso pode ser utilizado para atingir parte da demanda do departamento. Ou seja, analisar o casamento entre a oferta e demanda de energia.
- Analisar o comportamento do sistema HCPV no que diz respeito à geração de energia e entrega de energia na rede elétrica do DEN.
- Realizar um dimensionamento de um sistema fotovoltaico que atenda uma parte significativa da demanda do departamento.

METODOLOGIA DO TRABALHO

Demanda Energética do Departamento de Energia Nuclear da UFPE

Elaboração e aplicação de questionários de avaliação do consumo energético e levantamento do perfil de demanda energética do DEN: O trabalho se baseia no consumo de uma das subestações do Departamento de Energia Nuclear da UFPE (DEN). Para obter os dados necessários para a estimativa do consumo dessa subestação, foi preciso determinar quais salas do departamento são alimentadas pela mesma. Para isso, foi feita a análise da planta com ajuda dos funcionários do departamento.

Após a delimitação do espaço a ser analisado, foi realizada uma visita a cada sala para fazer a contagem dos equipamentos eletrônicos (lâmpadas, ar condicionados, computadores, entre outros) e de suas especificações de potência e de tempo de uso ao longo dos dias e do mês para poder obter uma estimativa mais próxima possível do consumo mensal do DEN. Para os equipamentos em que não foi possível obter as especificações, foram utilizados valores médios de equipamentos equivalentes obtidos do site da PROCEL (PROCEL, 2006).

Características do Sistema Fotovoltaico

O sistema é composto por 30 módulos HCPV montados sobre um rastreador (sistema de seguimento do sol) com uma área total instalada de 47m², gerando uma potência total de 10 kW_{pico}. Cada módulo possui 42 células acopladas com um sistema ótico (lente de Fresnel) que gera uma concentração de 1000 vezes a luz do sol.

A energia gerada pelos módulos é acondicionada por um inversor de frequência trifásico, do fabricante SMA de 10kW (Sunny Tripower 10000TL), o qual permite injetar a energia gerada pelo sistema na rede de distribuição de baixa tensão para ser aproveitada pelos usuários da rede. A ligação do sistema é feita diretamente na rede interna do departamento, permitindo verificar o comportamento do sistema em interação com a rede de energia convencional.

O processo de instalação do gerador foi realizado por meio da montagem da estrutura sobre a bancada desenvolvida na UFPE, o alinhamento de cada uma das estruturas envolvidas no sistema de seguimento solar e a fixação de toda a estrutura sobre o suporte fixo de 2m de altura, com a ajuda de um guindaste. O Gerador montado pode ser visualizado na Figura 1.



Figura 1. Gerador HCPV instalado no Departamento de Energia Nuclear-UFPE.

Monitoramento dos dados

Durante a operação do sistema HCPV as seguintes grandezas foram monitoradas:

- Irradiância direta incidente no plano do coletor (I_{bn});
- Irradiância global (I_h);
- Irradiância difusa (I_d);
- Potência na saída do gerador fotovoltaico (P_{CC});
- Temperatura das células;
- Potência por fase na saída do inversor (P_{CA});
- Potência consumida na subestação (por fase).

As irradiâncias global e difusa são medidas na subestação do DEN com piranômetros PSP Eppley, localizada próximo ao sistema HCPV e monitoradas com um sistema de aquisição de dados do fabricante Campbell. A irradiância direta é medida utilizando-se um pireliômetro acoplado à estrutura do rastreador (tracker).

As temperaturas das células são medidas em 2 pontos logo abaixo dos módulos fotovoltaicos utilizando-se sensores PT-1000.

As potências CC e CA são medidas internamente pelo inversor. Um dispositivo de monitoramento (UPS) próprio do sistema HCPV fornece essas medidas.

A potência consumida na subestação é medida utilizando-se um analisador de energia trifásico. O dispositivo fornece, além dos valores de potência, as características da energia entregue à rede. Devido à falta de disponibilidade do analisador de energia para as medições ao longo de todo o período, o período de medição de potência consumida compreendeu apenas dias de Março, Junho, Julho e Setembro.

Energia Solar Disponível

A análise da energia solar disponível na área onde o sistema foi instalado foi feita a partir dos valores médios mensais de radiação solar diária a longo-prazo (H_h), obtidos no Atlas Solarimétrico do Brasil (Tiba et al., 2000) e dos parâmetros calculados com base na geometria Sol-Terra. O modelo de Collares-Pereira (1979) foi utilizado para obtenção de valores horários de irradiância solar difusa (I_d), global (I_h) e, conseqüentemente, direta no plano horizontal (I_{bn}).

A irradiância direta no plano do coletor (I_{bn}), irradiância efetivamente utilizada para geração é calculada dividindo-se o valor da irradiância direta no plano horizontal pelo cosseno do ângulo zenital.

Uma vez obtida I_{bn} , foi calculada uma média da radiação solar em Recife (Pernambuco- Brasil) para um dia médio de cada um dos dozes meses do ano. Essa média foi utilizada para calcular a radiação solar, em kWh/m², em cada mês.

Os valores mencionados representam um comportamento médio a longo-prazo. Além da estimativa a longo-prazo, a irradiância I_{bn} é também medida, conforme mencionado anteriormente, por um pireliômetro instalado na própria estrutura do sistema HCPV.

Os dias médios mensais (dia Juliano) utilizados para o cálculo da radiação solar direta são mostrados na Tabela 1 (Duffie and Beckman, 1992),

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

Tabela 1. Dia Juliano médio por mês.

O valor utilizado para a latitude (λ) foi $\lambda = -8.056917$ (Recife-Pernambuco, Brasil).

Após o cálculo de I_{bn} para cada hora do dia médio de cada mês, os valores são somados para obter a irradiância média por dia em cada mês. Multiplicando-se esse valor pela quantidade de dias no respectivo mês obtém-se um valor para a irradiância média total em cada mês.

Energia gerada e energia injetada na rede

Utilizando-se os resultados das medições de potência gerada (CC) e potência na saída do inversor, e correlacionando-se esses valores com a irradiância direta incidente no plano do gerador, é possível obter equações que permitem estimar, para qualquer perfil de irradiância (I_{bn}) os valores de potência gerada (P_{CC}) e injetada na rede elétrica (P_{CA}).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Demanda de Energia do DEN

O levantamento de dados sobre os equipamentos eletrônicos do DEN resultou em um total de 803 dispositivos nas salas alimentadas pela subestação em análise. Desses 803 equipamentos, foram computadas 507 lâmpadas, 60 aparelhos de ar condicionado, 72 computadores fixos, 26 notebooks, entre outros, apresentando um consumo total de 27.175,61 kWh/mês.

Observou-se claramente que os aparelhos de ar-condicionado são os grandes responsáveis pelo consumo de energia elétrica, visto que estes apresentaram um consumo de 20.618,76 kWh/mês, valor correspondente a 75,87% do valor total, enquanto que as lâmpadas foram responsáveis por 13,19%.

A partir dos cálculos mencionados, foi possível traçar gráficos que resumem o comportamento estimado para o consumo do departamento durante um dia de semana médio (Figura 2) e os valores medidos para esse período (durante os meses de Março, Junho, Julho e Setembro).

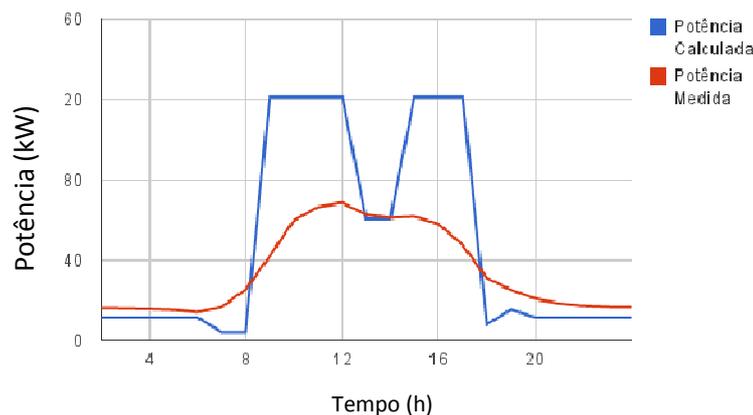


Figura 2. Potência média consumida por hora em um dia de semana. Valores estimados e valores medidos.

As diferenças notadas entre a curva calculada e a curva medida devem-se às considerações realizadas sobre os períodos de funcionamento dos equipamentos, ar condicionado, iluminação e outros. Por exemplo, foi considerado que durante o período do almoço, apenas 50% da carga está em uso. Durante o período noturno, considerou-se apenas a operação dos aparelhos como refrigeradores, que ficam ligados 24h/dia, e das lâmpadas dos corredores, que são acesas às 18h e apagadas às 6h. Durante o período diurno, fora do horário de almoço, todas as cargas declaradas pelos usuários como ligadas, foram computadas.

As considerações realizadas nos cálculos da carga diária de que todos os equipamentos em questão estão ligados durante o dia resultaram em um valor muito alto para o consumo. É possível observar que na prática, aproximadamente 50% desses equipamentos estão em funcionamento durante este período.

Os valores medidos durante vários dias para a carga do DEN no período de segunda a sexta (dias úteis) resultaram em um valor diário, médio mensal de 810 kWh, enquanto que para os fins de semana esse valor fica em torno de 363 kWh, ou seja, o consumo durante o final de semana no DEN é, em média, 45% do valor consumido durante os dias úteis.

Energia Solar direta incidente no plano do coletor

Os resultados dos cálculos da energia solar diária incidente no plano do coletor são mostrados na Figura 3 para a radiação direta, diária, média mensal, ao longo do ano.

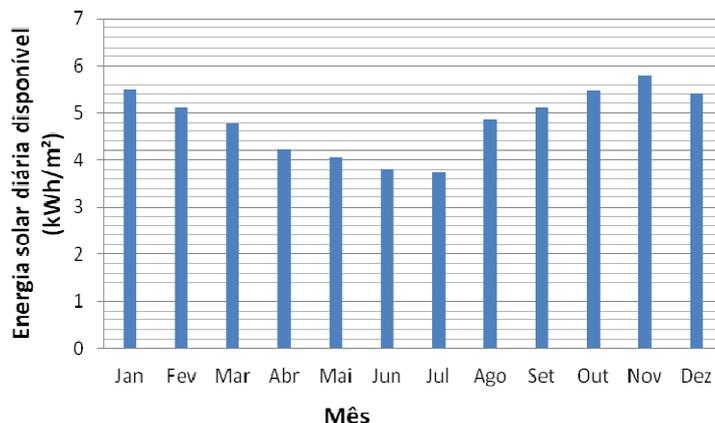


Figura 3. Energia solar direta, diária, média mensal incidente no plano do coletor ao longo do ano para a cidade de Recife

De acordo com a Figura 3, o mês com maior radiação direta é novembro, com valor diário de 5,77 kWh/m², e o mês com menor valor é julho com 3,72 kWh/m². Considerando-se uma área efetiva de geradores da ordem de 38,1 m², podem-se estimar os valores de energia disponíveis mês a mês. Os valores mencionados representam uma energia diária incidente na área de coletores de 219,8 kWh e 141,9 kWh respectivamente.

Energia produzida e entregue à rede do DEN

A potência gerada (CC) e convertida (CA) foram estimadas com base nos gráficos mostrados nas Figuras 4 e 5.

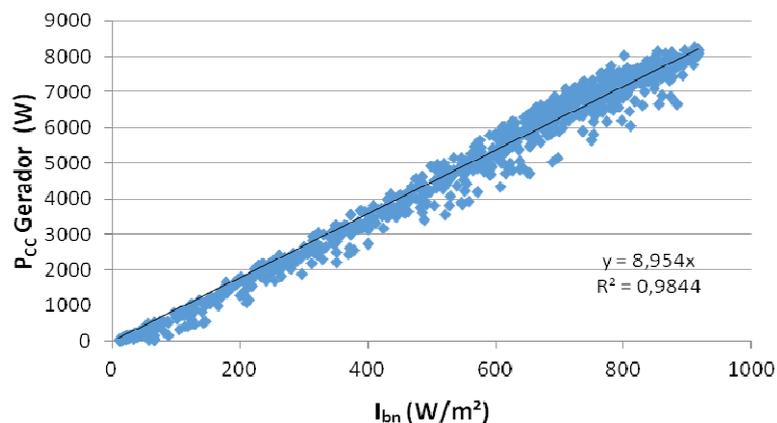


Figura 4 – Potência CC gerada em função da irradiância direta coletada

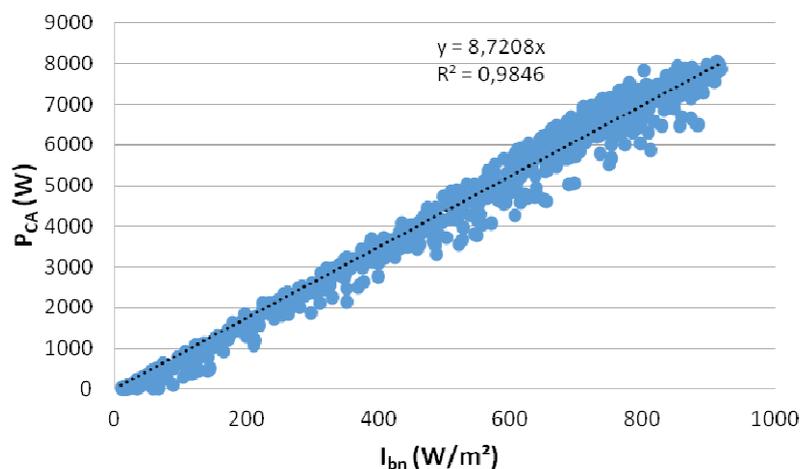


Figura 5. – Potência CA gerada em função da irradiância direta coletada

Nas Figuras 4 e 5 é possível verificar a boa correlação existente entre as grandezas PCC e I_{bn} (98,4%) e entre P_{CA} e I_{bn} (98,5%). A semelhança entre as curvas mostradas é o resultado da utilização de um inversor com eficiência elevada, da ordem de 98% para a carga operacional.

Com os valores de I_{bn} estimados para dias médios mensais (longo prazo) (Fig. 3) e utilizando-se as correlações mostradas nas Figuras 4 e 5 foi possível estimar a energia gerada média mensal a longo-prazo para o sistema HCPV (Figura 6), considerando-se as características da radiação solar na cidade de Recife.

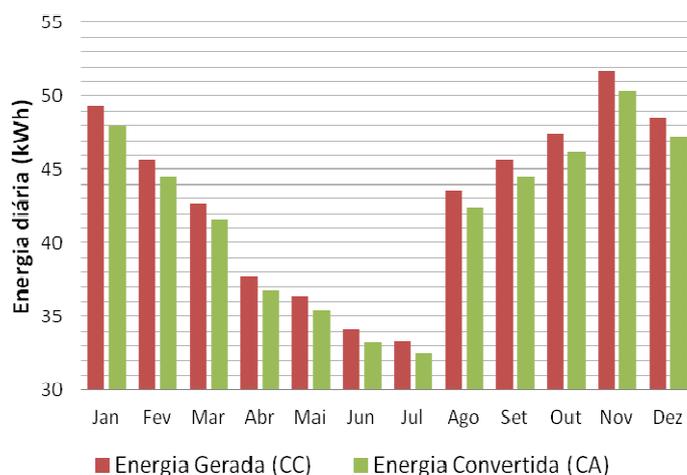


Figura 6 - Energia CC gerada e energia CA convertida - médias mensais a longo-prazo para o sistema HCPV em Recife.

Na Figura 6 podem ser observados valores diários médios mensais de potência gerada da ordem de 50,3 kWh para o mês de

novembro (mês com maior irradiância direta) e de 32,5 kWh para o mês de julho (mês com menor incidência de irradiância direta). O valor diário, médio anual de energia entregue à rede pelo sistema é da ordem de 41,9 kWh.

Considerando-se o perfil médio de demanda medido como uma primeira estimativa de demanda, constante ao longo do ano, verifica-se que nos períodos de Julho e Novembro, quando os valores de geração são, respectivamente, o mais baixo e o mais alto, o sistema poderia suprir, em média, 13,86% da demanda de energia de um fim de semana em Novembro (melhor situação) e 4% da demanda de energia de um dia útil de Julho (pior situação). A Figura 8 mostra os percentuais de atendimento de demanda durante a semana e fins de semana.

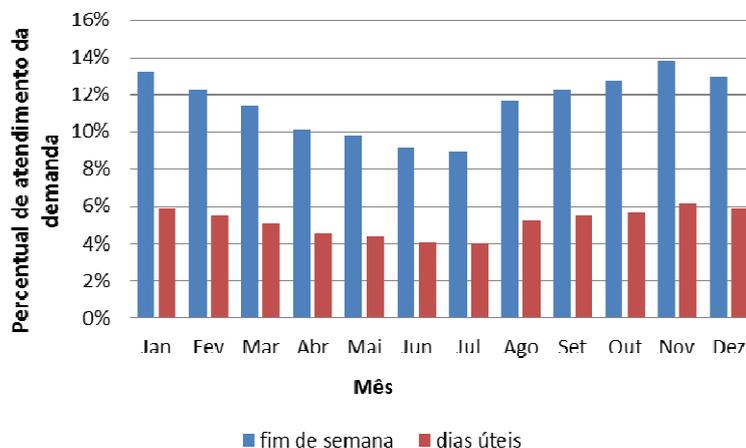


Figura 8 - Percentuais de demanda atingidos pelo sistema HCPV nos dias de semana e finais de semana.

Verifica-se que durante os fins de semana o sistema atende, durante todo o ano, mais de 9% da demanda do departamento, chegando a aproximadamente 14% em novembro. Para a demanda de dias úteis esses valores encontram-se entre 4% e 6,2%.

Considerando-se o valor médio anual de 41,9 kWh de energia CA gerada diariamente, estima-se que um sistema de 60 kWp (6 vezes maior que o atual) poderia atender cerca de 31% da demanda de dias úteis e 69% da demanda de fim de semana medida na subestação do Departamento de Energia Nuclear da UFPE. Uma análise da relação custo benefício deve ser ainda realizada considerando-se o sistema de compensação de energia que pode ser adotado como forma de reduzir os custos da energia do departamento.

CONCLUSÕES

Comparando-se os valores de potência gerada e demanda, verifica-se um bom casamento entre ambos. As maiores demandas de energia ocorrem exatamente no período de maior oferta de radiação solar (próximo ao meio dia).

Os resultados dos cálculos da irradiância solar no plano do coletor mostram que o mês com maior radiação solar direta é novembro, com valor diário de 5,77 kWh/m², e o mês com menor valor é julho com 3,72 kWh/m². Considerando uma área efetiva de 38,1 m² do coletor, estima-se que há disponível, nos meses de novembro e julho, uma energia diária incidente na área de coletores de 219,8 kWh e 141,9 kWh respectivamente.

Os resultados obtidos nesse trabalho permitem observar que o sistema HCPV instalado na área externa do DEN é capaz de abastecer, na melhor situação, aproximadamente 14% da demanda energética do departamento. Tendo em vista que para um dia de fim de semana, as lâmpadas são responsáveis por aproximadamente 13% do consumo do departamento, pode-se afirmar que, para o mês de novembro, quando o gerador opera sobre as melhores condições, o sistema é capaz de suprir toda a iluminação do departamento.

AGRADECIMENTOS

À Abengoa Brasil pelo fornecimento recursos para a aquisição dos equipamentos e materiais que permitiram a realização deste estudo e ao CNPq pelo incentivo por meio de bolsas para os estudantes.

REFERÊNCIAS

- ANEEL (2011). Chamada N° 13/2011. Arranjos Técnicos e Gerenciais Para Inserção Da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2011-ChamadaPE13-2011.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2014.
- ANEEL (2012). Normativa N° 482. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

Chen, M. B. et al. Study of p-on-n GaInP₂/GaAs tandem cells. XXIX IEEE photovoltaic specialists conference. May 19-24

2002; New Orleans LA, USA.

Collares-Pereira M., Rabl A. 1979. The average distribution of solar radiation correlation between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* 22: 155-164.

Duffie J.A., Beckman W.A. 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th Edition. John Wiley & Sons. New York.

Fernández, E. F., Pérez-Higueras, P., Almonacid, F., Loureiro, A. G., Fernández, J. I., Rodrigo, P., ... & Almonacid, G. (2012, October). Quantifying the effect of air temperature in CPV modules under outdoor conditions. In *8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONCENTRATING PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: CPV-8* (Vol. 1477, No. 1, pp. 194-197). AIP Publishing.

Fraunhofer, Institut für Solare Energiesysteme ISE. World Record Solar Cell with 44.7% Efficiency chart 2013. Disponível em: http://www.ise.fraunhofer.de/en/press-and-media/press-releases/presseinformationen-2013/world-record-solar-cell-with-44.7-efficiency?set_language=en Acesso em: Nov. 2013

Negrão W., Zilles R. 2003. Qualidade de Energia da Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede na USP. Congresso Latino Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica. p. 11.

Pérez-Higueras, P., Munoz, E., Almonacid, G., & Vidal, P. G. (2011). High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 1810-1815.

PROCEL (2006). Dicas de Economia de Energia. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={E6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000}>>. Acesso em: 10 jan. 2014.

Tiba, C. et al. 2000. Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados solarimétricos. Editora Universitária da UFPE. Recife.

Vilela, O. C.; Silva, H. M.; Veloso, D.; Uribe, F. J. B.; Fraidenraich, N. Sistemas Fotovoltaicos de alta concentração (HCPV). Revisão de Conceitos. In: 3º RenoMat - International Conference on Materials and Processes for Renewable Energy, 2013, Porto Alegre. Anais do 3º RenoMat - International Conference on Materials and Processes for Renewable Energy. Porto Alegre: Fundação Luiz Englert, 2013. v. 3. p. 1-10.

ABSTRACT

This paper analyzes the operational characteristics of a High Concentration Photovoltaic (HCPV) generator of 10 kWp with a concentration ratio of 1000 suns installed on the external area of the Nuclear Energy Department of the Federal University of Pernambuco. The system has been installed and monitored. D.C. power generated, converted A.C. power, solar radiation (direct solar radiation) have been measured. The consumption of electricity was estimated considering all the electric appliances of the department and the time expected for use. Using correlations available in the literature, direct incident irradiance on the plane of the generator were estimate each hour for the most representative day of each month. From the experimental results and the simulations was possible to establish a relationship between supply and demand for energy, concluding that the PV generator in the best operating condition, can reach, in the best situation, approximately 14% of electricity consumption of the department, which is equivalent to the light expense of the building.

Keywords: Solar energy, High Concentration Photovoltaics, Photovoltaic conversion, Grid-connected Systems, multi-junction solar cells.