

ANÁLISE DE GERAÇÃO DE DOIS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE INSTALADOS NO LABORATÓRIO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO GEDAE

Pedro Ferreira Torres – pedro.ftorres@itec.ufpa.br

Alan Sousa Amorim – alan.amorim@itec.ufpa.br

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

Renato Luz Cavalcante – renatolc@ufpa.br

Wilson Braga Júnior – wbj99@yahoo.com.br

Marcos André Barros Galhardo – galhardo@ufpa.br

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Elétrica, GEDAE

Resumo. Este artigo tem como objetivo apresentar resultados operacionais de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede em funcionamento no campus da Universidade Federal do Pará, em Belém. Um dos sistemas está em funcionamento desde novembro de 2012 e o outro, desde dezembro do mesmo ano, ambos instalados nas dependências do Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética do GEDAE. Os sistemas são compostos por geradores fotovoltaicos de potências instaladas iguais a 1,21 kWp e 1,68 kWp, bem como por inversores de diferentes fabricantes, com potências nominais iguais a 1,0 kW e 1,2 kW, respectivamente, sendo o inversor de 1kW de fabricação nacional.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica, Sistemas fotovoltaicos conectados à rede, Análise de desempenho.

1. INTRODUÇÃO

A busca por alternativas às fontes não renováveis de energia está cada vez mais presente nos diversos segmentos da pesquisa acadêmica. Uma alternativa energética competitiva, confiável e segura para o fornecimento de energia elétrica em regiões urbanas, pode ser concretizada por meio dos denominados Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCRs) (Macêdo, 2006, Cavalcante, 2011). A energia solar fotovoltaica é uma opção que vem ganhando força no cenário nacional, inclusive no meio comercial, com a aprovação da Resolução Normativa ANEEL nº 482, que estabelece as condições gerais para o acesso da mini e microgeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica convencionais. Essa resolução possibilita que microssistemas de geração, como os apresentados neste trabalho, sejam interligados à rede elétrica.

Neste trabalho apresentam-se alguns resultados operacionais sobre essa aplicação, procurando contribuir para a construção do conhecimento associado ao uso de sistemas fotovoltaicos distribuídos em clima quente e úmido, com ênfase na aplicação de um inversor nacional comparado a um inversor importado. O trabalho visa complementar trabalhos como o relacionado à implantação e avaliação de desempenho operacional de um SFCR de 2,8 kWp instalado na cidade de Belém do Pará, onde dados de contribuição energética diária e perdas de conversão c.c.-c.a são apresentados (Macêdo et. al., 2012).

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A seguir são descritos os dois sistemas avaliados neste artigo: o primeiro encontra-se em operação com um gerador fotovoltaico de 1,21 kWp, com tecnologia de filme fino, conectado a um inversor de fabricante nacional de 1 kW, e o segundo opera com um gerador fotovoltaico de 1,68 kWp, com tecnologia de silício policristalino, conectado a um inversor importado de 1,2 kW. Ambos os sistemas estão localizados na cidade de Belém, Pará, cujas coordenadas geográficas são 01°24'S e 48°28'W e altitude 14 m.

2.1 Descrição do sistema com inversor nacional

Inicialmente, este SFCR era composto por um gerador fotovoltaico formado por 21 módulos de modelo KC 80, do fabricante Kyocera. Os módulos, com potência de 80 Wp cada, eram associados em série, totalizando uma potência de placa de 1,68 kWp. Contudo, devido ao seu tempo de uso, ressalta-se que medições realizadas em alguns desses módulos indicaram valores de potência nas condições padrão da ordem 55 a 60 Wp. A Tab. 1 mostra as especificações elétricas dos módulos utilizados.

Tabela 1 - Especificações técnicas do módulo KC 80.

Potência máxima	80 W	Corrente de curto circuito	4,97 A
Tensão de Máxima Potência	16,9 V	Temp. Nominal de operação da célula	47 °C
Corrente de Máxima Potência	4,73 A	Células por módulo	36
Tensão de Circuito Aberto	21,5 V	Tecnologia da célula	Policristalina
Dimensões (A x L x P) em mm	976 x 652 x 56	Massa	8,0 kg
Coefficiente de temperatura de curto-circuito	4,05 mA/°C	Coefficiente de temperatura de Circuito Aberto	- 82,4 mV/°C

Na Tab. 2 são apresentadas as características do inversor nacional utilizado para a conexão com a rede elétrica, e na Fig. 1 mostra-se a forma como o inversor encontra-se instalado na parede externa da edificação, abrigado pelo beiral do telhado.

Tabela 2 - Especificações técnicas do inversor de 1kW.

Potência nominal CA	1 kW	Rendimento de Conversão nominal	90 %
Potência PV máxima recomendada	1,7 kW	Rendimento rastreamento do PMP	> 99%
Tensão CC máxima	400 Vcc	Consumo próprio	20 W
Faixa de tensão de PMP	130 - 300 Vcc	Tempo de Reconexão	10 – 300 s (configurável)
Tensão de partida	130 Vcc	Massa	32 kg
Corrente de entrada máxima CC	7 Acc	Dimensões (A x L x P) em mm	605 x 422 x 286
Saída CA	220 Vca	Frequência nominal	60 Hz
Proteção contra inversão de polaridade CC	Diodo de Curto-circuito	Distorção harmônica da corrente	< 4 %



Figura 1 - Inversor de 1kW instalado no GEDAE.

A partir de maio de 2013, o gerador FV do sistema foi alterado, estando atualmente em operação com 1,21 kWp, formado por 10 módulos de 121 Wp. A associação é feita em série de 5 módulos com duas fileiras em paralelo. Os módulos são do fabricante DuPont, modelo DA 121 – C1 cujas características técnicas são apresentadas na Tab. 3. Na Fig. 2 (a) é possível observar o gerador fotovoltaico instalado em estrutura independente de alumínio na área externa do laboratório do GEDAE. A orientação e a inclinação correspondem a Norte e 13°, respectivamente.

Tabela 3 - Especificações Técnicas do módulo DA 121 – C1.

Potência máxima	121 W ± 5 %	Corrente de Curto-circuito	1,23 A
Tensão de Máxima Potência	115,8 V	Dimensões (A x L x P) em mm	1,409 x 1,110 x 35
Corrente de Máxima Potência	1,03 A	Massa	20,0 kg
Tensão de Circuito Aberto	148,6 V	Temperatura nominal de operação da célula	-40~+85°C
Coefficiente de temperatura de Curto-circuito	+ 0,09% /°C	Coefficiente de temperatura de Circuito Aberto	- 0,30% /°C

Para a aquisição de dados é feita a leitura diária em um medidor eletrônico baseado no sistema de créditos. A energia contabilizada em um dia é dada pela diferença entre os créditos observados no final do dia e os créditos contabilizados do dia anterior. A Fig. 2 (b) mostra os medidores instalados próximos ao inversor.

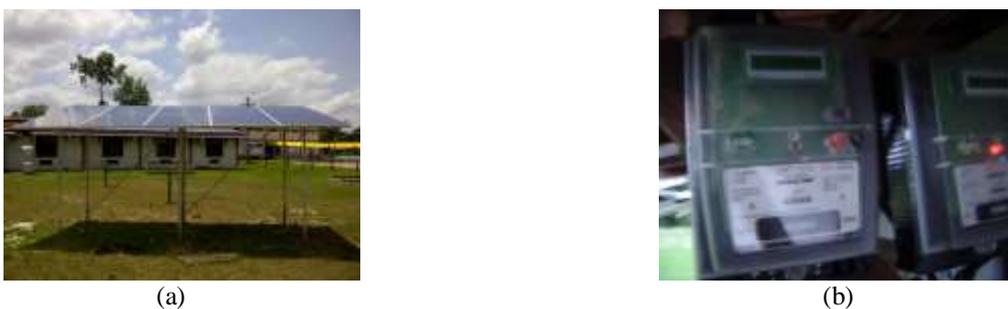


Figura 2 - Gerador FV composto por 10 módulos de 121 Wp e medidores para aquisição de dados de geração.

2.2 Descrição do sistema com inversor de tecnologia importada

Este sistema possui como gerador um conjunto de 14 módulos policristalinos do fabricante Kyocera, modelo KC120, cada um com potência nominal de 120 Wp, todos conectados em série, totalizando uma potência de 1,68 kWp. A Fig. 3 mostra os módulos instalados sobre o telhado do laboratório do GEDAE.



Figura 3 - Vista do gerador FV de 1,68 kWp, instalado no telhado da edificação.

Os módulos estão orientados a 19° noroeste e inclinados de 14° com relação à horizontal. A Tab. 4 mostra as especificações técnicas do módulo utilizado e a Fig. 4 mostra uma planta virtual da edificação, onde é possível observar o gerador descrito neste trabalho juntamente com outros geradores integrados ao laboratório do GEDAE.

Tabela 4 - Especificações técnicas do módulo KC 120 utilizado no telhado do GEDAE.

Potência máxima	120 W	Células por módulo	36
Tensão de Máxima Potência	16,9 V	Tecnologia da célula	Policristalina
Corrente de Máxima Potência	7,1 A	Dimensões (A x L x P) em mm	1425 x 652 x 36
Tensão de Circuito Aberto	21,5 V	Massa	11,9 kg
Corrente de Curto-Circuito	7,45 A	Eficiência de conversão da célula	> 14%

Fonte: Manual do fabricante.

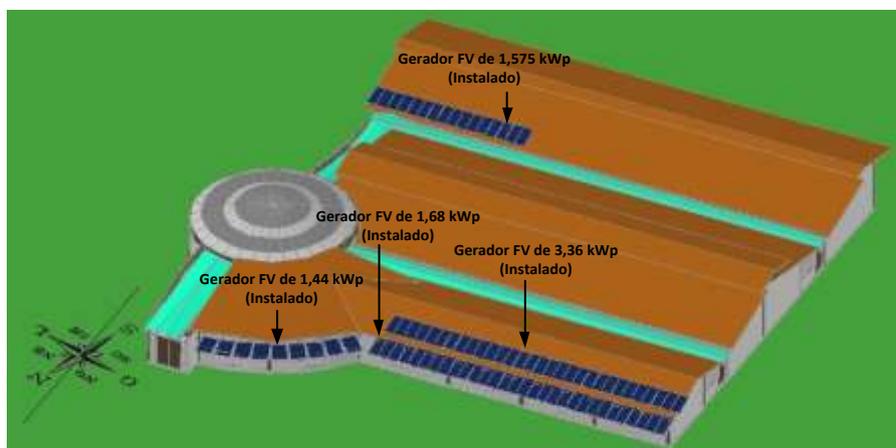


Figura 4- Incorporação dos módulos fotovoltaicos na edificação.

Vale ressaltar que a edificação está localizada nas coordenadas geográficas correspondentes à latitude de 1° 24' S e longitude de 48° 28' O, com sua face desviada do norte verdadeiro de aproximadamente 19° noroeste. A Fig. 5 mostra uma simulação realizada com o auxílio do programa computacional Autodesk Ecotect Analysis 2011, com os diagramas de passagem do sol ao longo do ano, com destaque para os limites onde ocorrem os equinócios e os solstícios.

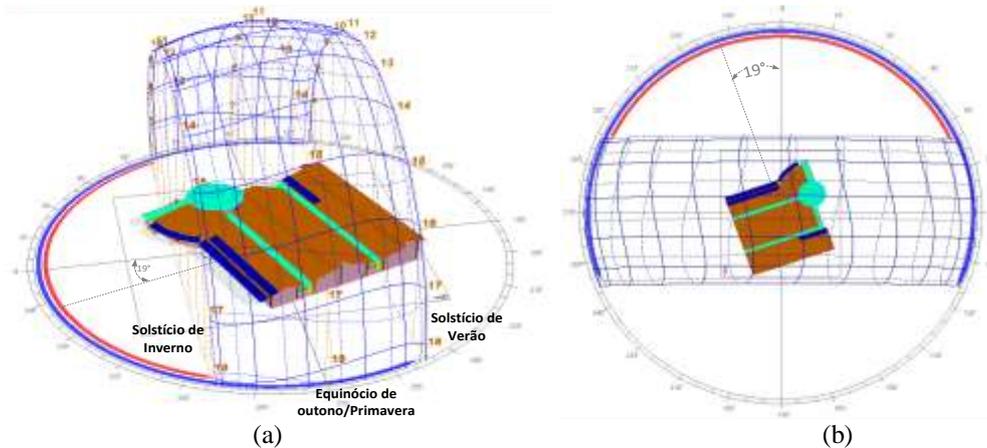


Figura 5- Diagrama de movimento aparente do Sol ao longo do ano e sua relação com a orientação da edificação: (a) Perspectiva; (b) Vista superior.

Com base nas Fig. 5(a) e 5(b) e na inclinação do gerador FV, estima-se que não haverá grandes perdas, em termos de captação do recurso solar ao longo do ano, devido ao desvio do gerador FV com relação ao norte verdadeiro.

Para a interligação do gerador FV à rede elétrica foi utilizado um inversor importado, cujas especificações podem ser vistas na Tab. 5. A Fig. 6 (a) mostra o inversor fixado na parte interna da edificação.

Tabela 5 - Especificações Técnicas do inversor.

Potência nominal CA com 230V,50Hz	1,2 kW	Saída máxima de corrente CA	6,1 A
P_{CC} máx. com $\cos\phi = 1$	1,32 kW	Grau máximo de rendimento	91,2 %
Tensão CC máxima	400 Vcc	Grau de rendimento europeu	90,9 %
Amplitude de tensão MPP com 230 V CA	100V... 320 V	Consumo próprio em serviço	< 4 W
Tensão nominal CC	120 V	Proteção contra inversão de polaridade CC	Diodo de Curto-circuito
Corrente de entrada máxima CC	12,6A	Peso	23 kg
Tensão nominal CA	220 V /230 V /240 V	Dimensões (A x L x P) em mm	440 mm x 339 mm x 214 mm
Corrente nominal CA	5,2 A	Ondulação de tensão da tensão de entrada	< 10 %

Fonte: Adaptado do manual de instalação do inversor.

Para a ligação entre o gerador FV e o inversor, foi utilizada uma caixa de conexão, como mostra a Fig. 6 (b), onde ficam localizados um disjuntor e um conector tipo borne para a conexão dos polos positivo e negativo do gerador. A saída da caixa de conexão é realizada por um cabo multipolar de 2 x 6 mm², com a terminação em um *plug* industrial.



(a)



(b)

Figura 6 - Inversor de 1,55kW (a) e caixa de conexão (b)

3. RESULTADOS

Dados de geração diária de energia do SFCR cujo inversor é do fabricante nacional vêm sendo coletados desde novembro de 2012. Esses dados são obtidos diariamente através da leitura direta do medidor instalado próximo ao inversor. Consequentemente, nos dias em que esta leitura não é realizada, como por exemplo, em fins de semana, a contabilização da geração de energia é realizada de forma indireta: faz-se uma proporção entre a energia total gerada no período e a disponibilidade de energia solar diária no local. Tal aproximação é possível pelo fato de que os dados de irradiância são adquiridos diariamente e armazenados, mesmo em finais de semana.

A aquisição de dados do SFCR formado pelos 14 módulos KC120 da Kyocera, mais inversor importado, teve início em dezembro de 2012. Para este sistema foram tratados os dados coletados em seus 11 meses de funcionamento. Os resultados experimentais são apresentados na forma de dados diários de energia gerada e irradiação solar no local. Os dados de geração foram obtidos do próprio inversor, de forma análoga a como são obtidos os dados do sistema com o inversor nacional, enquanto que os dados de irradiação foram coletados por meio do *datalogger* DATATAKER com o auxílio do programa DeLogger 4 e um piranômetro fotovoltaico da marca Licor.

As Fig. 7 a 17 mostram os valores diários de geração fotovoltaica na saída dos inversores em kWh, além dos valores de energia disponível e da irradiação, em kWh/m². Pode-se observar o bom desempenho dos dois sistemas FV conectados à rede ao longo dos meses de funcionamento. Os dias em que não há dados de irradiação global em um plano inclinado de 10° foram causados pela falta de energia na rede pública de distribuição, que é responsável pela alimentação do sistema de aquisição e visualização dos dados. Além disso, percebe-se que o sistema com o inversor importado iniciou a sua operação no dia 10 de dezembro de 2012.

Para facilitar a análise das Fig. 7 a 17, chamaremos o sistema com inversor nacional de Sistema 1, e o SFCR com inversor importado de Sistema 2.

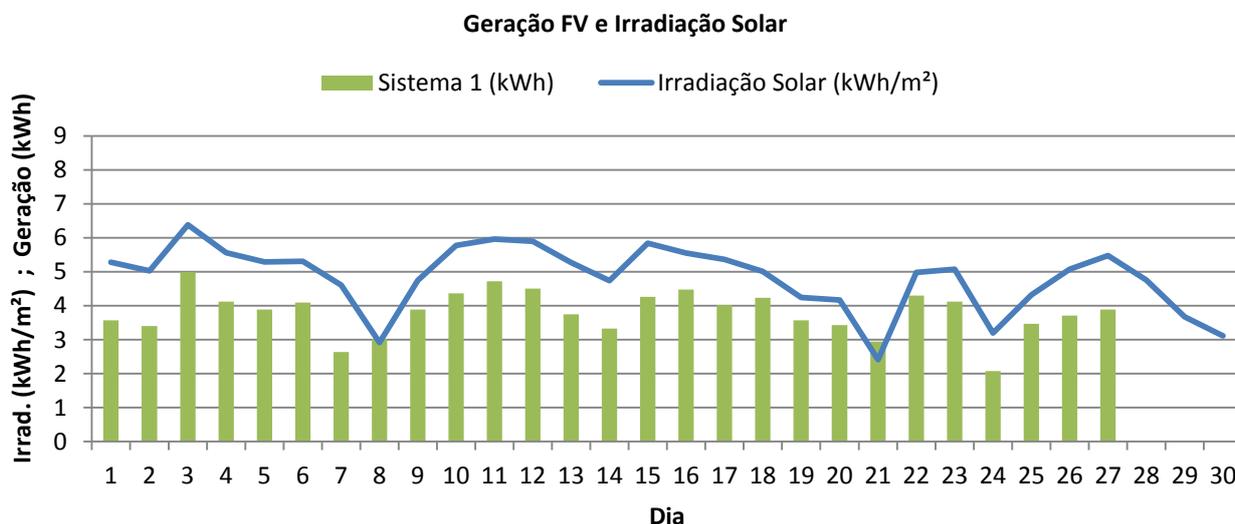


Figura 7 – Gráfico da energia gerada e da irradiação disponível em novembro de 2012. (Em operação apenas o SFCR com inversor nacional).

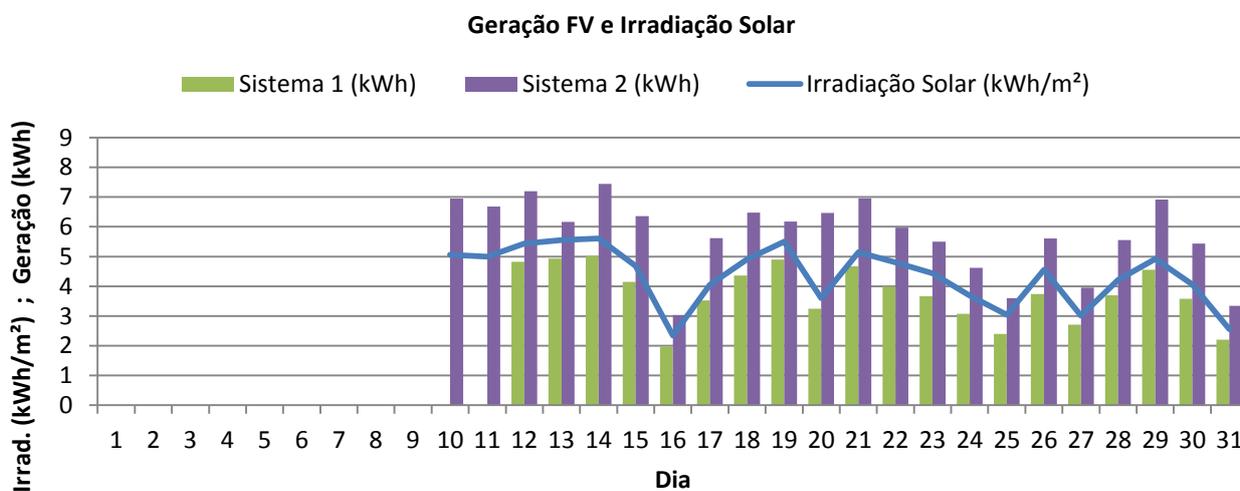


Figura 8 – Gráfico da energia gerada e da irradiação disponível em dezembro de 2012.

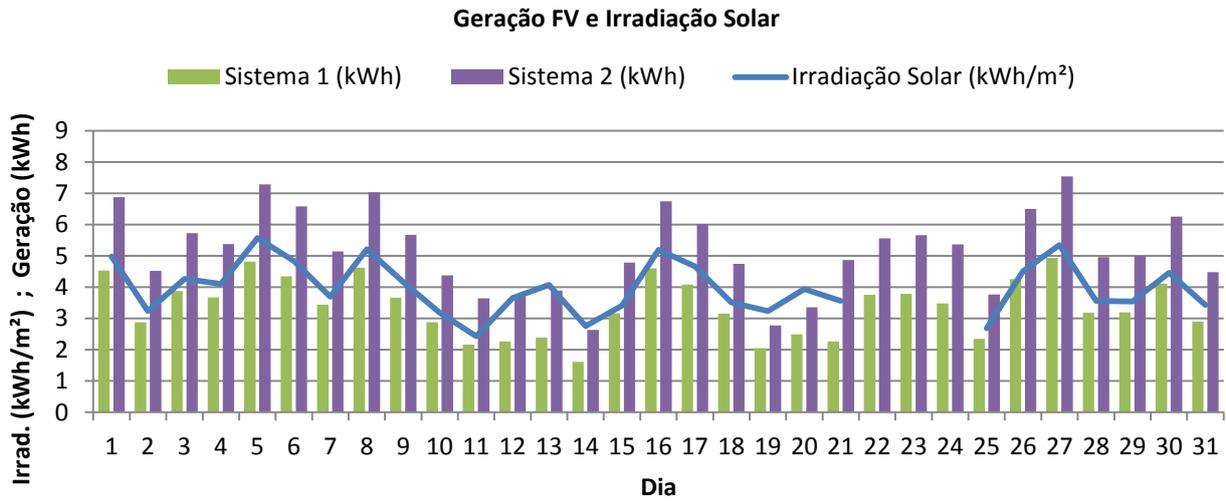


Figura 9 – Gráfico da energia e da irradiação disponíveis em janeiro de 2013.

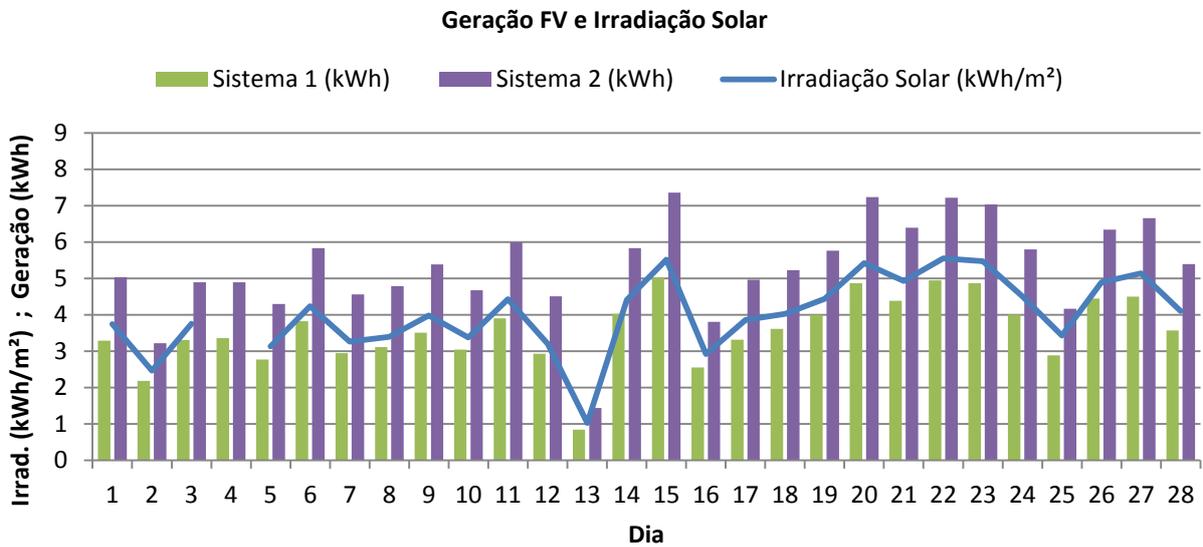


Figura 10 – Gráfico da energia e da irradiação disponíveis em fevereiro de 2013.

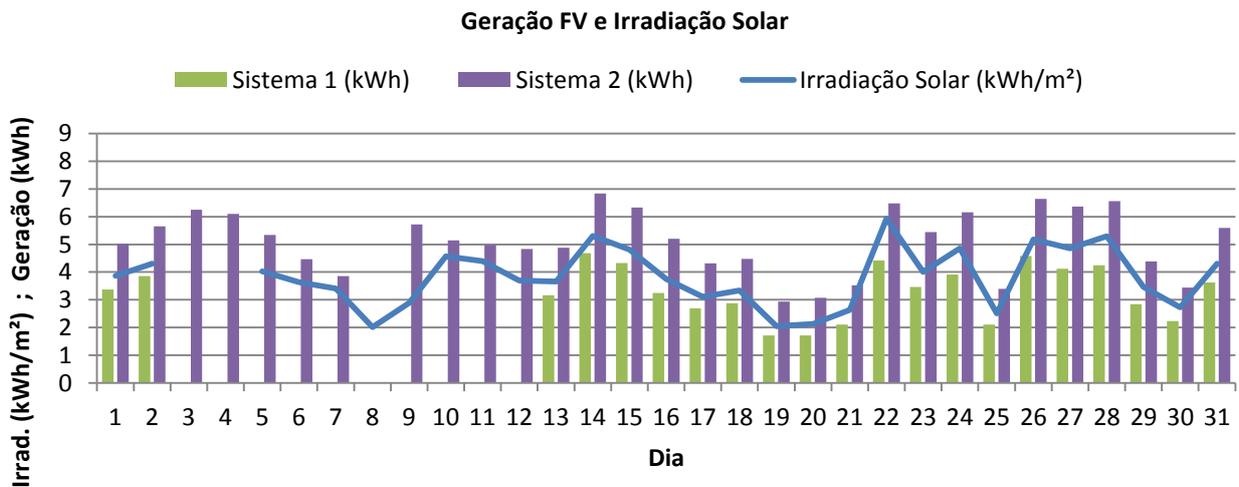


Figura 11 – Gráfico da energia e da irradiação disponíveis em março de 2013.

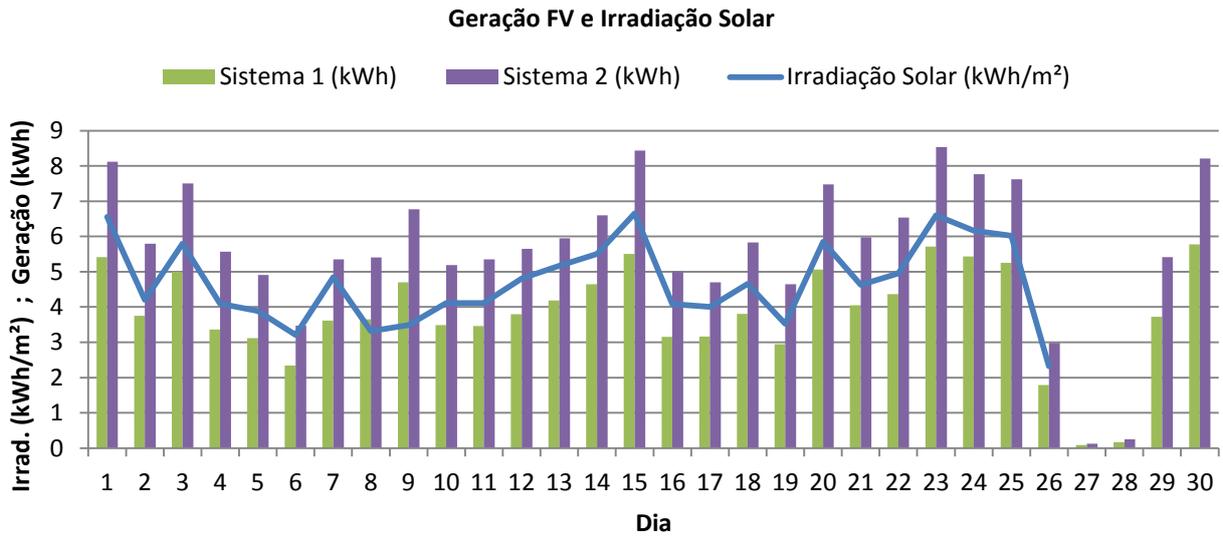


Figura 12 – Gráfico da energia e da irradiação disponíveis em abril de 2013.

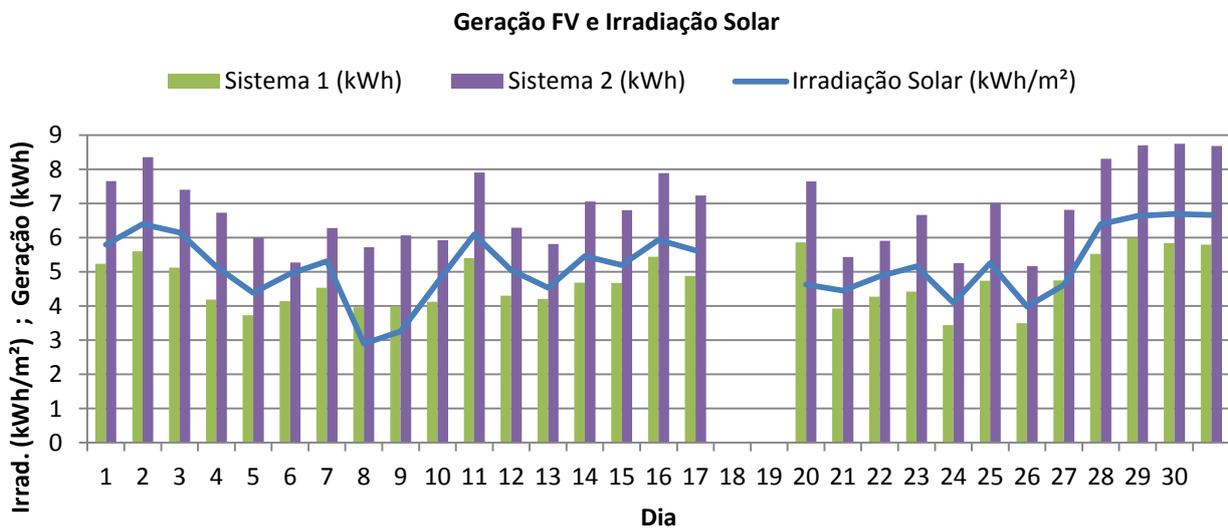


Figura 13 – Gráfico da energia e da irradiação disponíveis em maio de 2013.

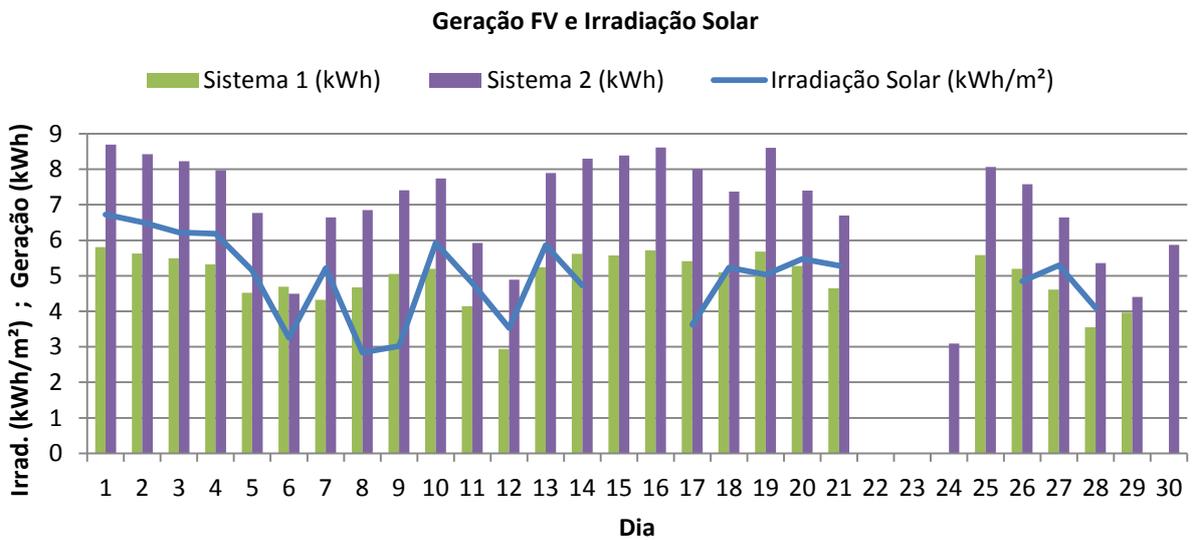


Figura 14 – Gráfico da energia e da irradiação disponíveis em junho de 2013.

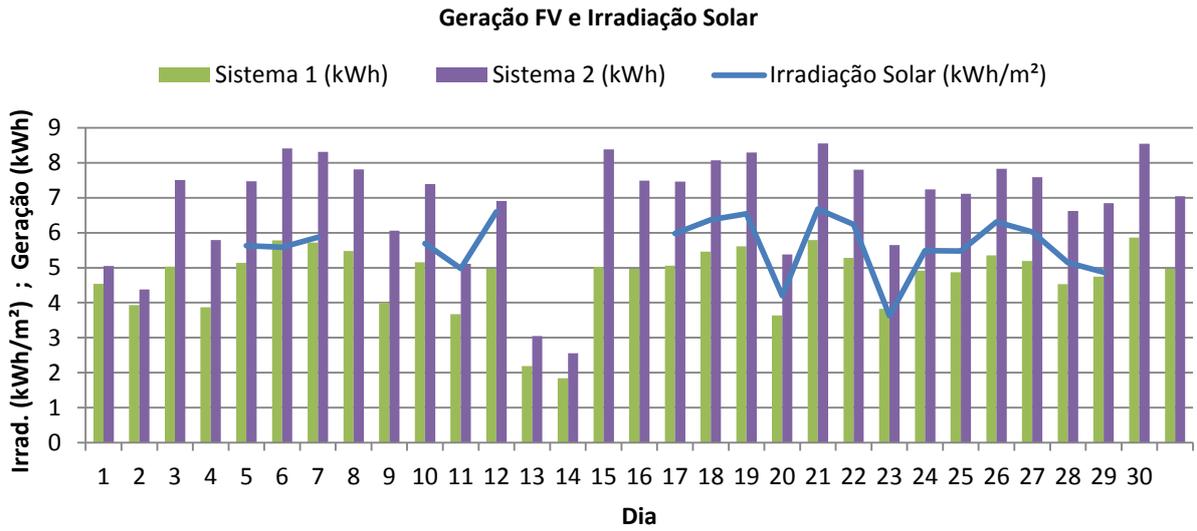


Figura 15 – Gráfico da energia e da irradiação disponíveis em julho de 2013.

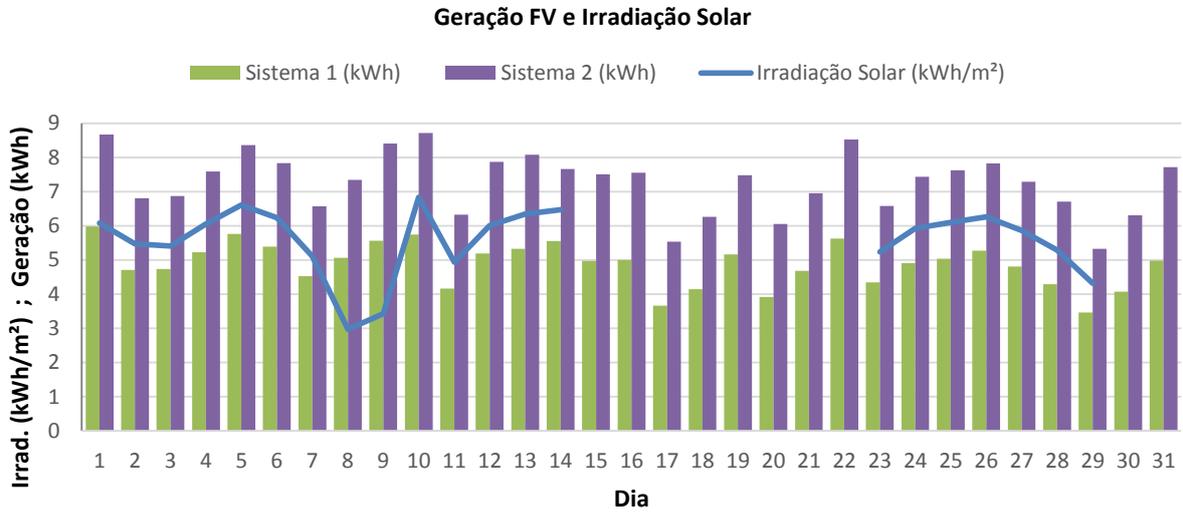


Figura 16 – Gráfico da energia e da irradiação disponíveis em agosto de 2013.

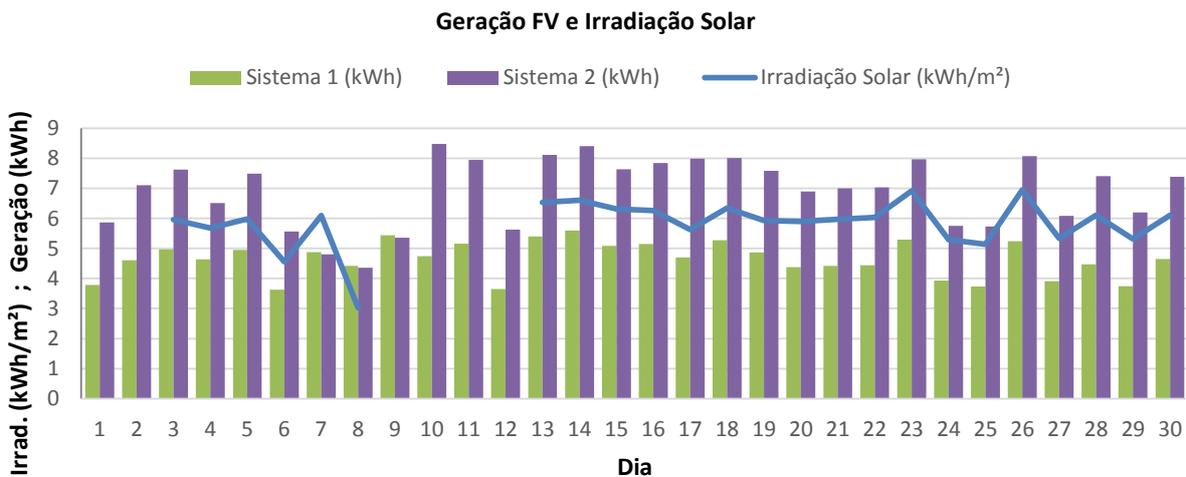


Figura 17 – Gráfico da energia e da irradiação disponíveis em setembro de 2013.

A Fig. 18 mostra a energia gerada ao longo dos meses por ambos SFCRs. No caso do sistema com o inversor nacional (Sistema 1), percebe-se que a partir de maio de 2013 a geração mensal cresceu, estando sempre acima de 120 kWh/mês. Isso pode ser explicado pelo aumento da irradiação solar e pela mudança no gerador FV, que, apesar de

apresentar potência nominal inferior, é novo, enquanto que o gerador antigo e de potência de placa maior já estava bastante degradado, tal como mencionado no item 2.1.

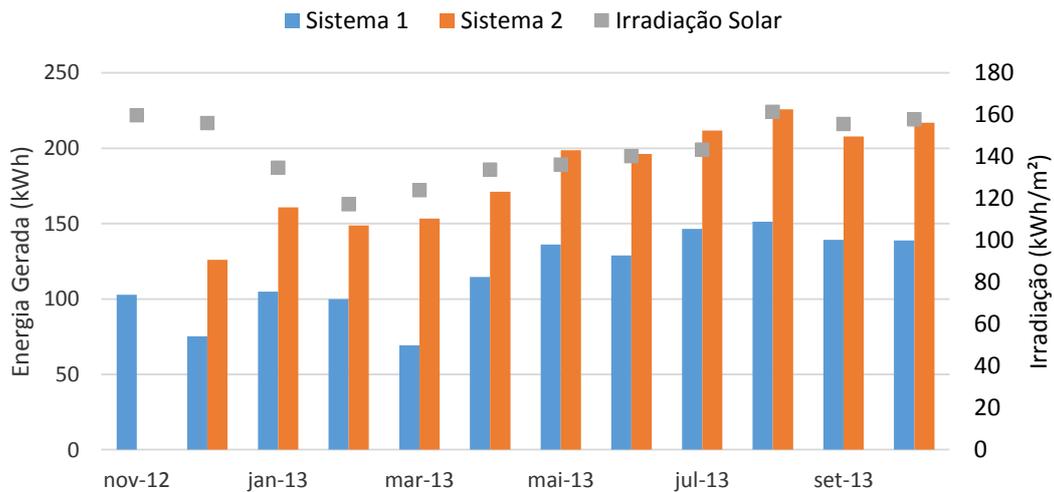


Figura 18 – Geração mensal dos SFCRs e irradiação solar de novembro de 2012 a outubro de 2013.

Dois parâmetros importantes na análise de SFCRs são a Produtividade do Sistema (Y_f) e o Rendimento Global (PR). A produtividade relaciona a geração com a capacidade do sistema, e o rendimento global relaciona a produtividade com a energia disponibilizada pelo sol em Horas de Sol Pleno. A Tab. 6 mostra dados de produtividade e rendimento global para os dois sistemas avaliados neste artigo. Os dados são referentes ao mês de maio de 2013, em função de este mês apresentar dados monitorados mais completos e quando o novo gerador do SFCR do inversor nacional já estava em operação. Novamente, chama-se de Sistema 1 o SFCR com inversor nacional, e de Sistema 2 o SFCR com inversor importado.

Tabela 6 – Dados de produtividade e rendimento global dos SFCRs para maio de 2013.

Dias em mai/13	Irrad. (kWh/m²)	Prod. Sistema 2 (kWh/kWp)	Prod. Sistema 1 (kWh/kWp)	PR Sistema 2 (%)	PR Sistema 1 (%)
1	5,80	4,55	4,33	80,97	74,67
2	6,39	4,97	4,62	80,15	72,36
3	6,15	4,40	4,23	73,88	68,89
4	5,15	4,01	3,46	80,11	67,11
5	4,38	3,57	3,08	84,03	70,39
6	4,95	3,14	3,42	65,37	69,19
7	5,31	3,74	3,74	72,54	70,50
10	4,70	3,53	3,41	77,48	72,52
11	6,10	4,70	4,46	79,52	73,21
12	5,05	3,74	3,55	76,38	70,33
13	4,53	3,46	3,47	78,63	76,61
14	5,46	4,20	3,87	79,37	70,96
15	5,20	4,05	3,86	80,21	74,20
16	5,93	4,70	4,50	81,56	75,76
17	5,63	4,30	4,03	78,81	71,61
21	4,45	3,23	3,24	74,93	72,99
22	4,87	3,52	3,53	74,51	72,58
23	5,16	3,96	3,65	79,17	70,79
24	4,10	3,13	2,84	78,63	69,43
25	5,25	4,18	3,92	81,97	74,57
26	3,99	3,08	2,89	79,62	72,44
27	4,62	4,05	3,93	90,49	85,06
28	6,40	4,95	4,56	79,71	71,34
29	6,63	5,18	4,95	80,45	74,59
30	6,69	5,20	4,83	80,21	72,16
31	6,66	5,17	4,79	79,92	71,90
Média	5,37	4,08	3,88	78,79	72,54

Pela análise dos dados percebe-se que o sistema 2 é mais produtivo e apresenta melhor rendimento global em relação ao SFCR com o inversor do fabricante nacional, com uma diferença de produtividade inferior a 5 % na maioria dos casos. Diferença um pouco maior verifica-se no PR, apresentando diferença de cerca de 8 % entre os sistemas.

4. CONCLUSÃO

O trabalho apresenta resultados reais de geração de energia de SFCRs em operação na Região Amazônica, mostrando dados provenientes de aquisições ao longo dos anos de 2012 e 2013, além de descrever os sistemas, permitindo realizar comparações e estudos que objetivem futuras aplicações relacionadas à conexão à rede de sistemas fotovoltaicos. Percebe-se a importância do monitoramento de dados, pois desta forma é possível analisar o desempenho dos sistemas por meio de diversos parâmetros, e assim, definir melhor as características de futuros sistemas.

A partir dos dados obtidos percebe-se que o desempenho do SFCR com tecnologia de conexão à rede nacional ainda é inferior ao de outra marca já consolidada no mercado. Entretanto, nota-se a importância de pesquisas relacionadas a este tipo de tecnologia, visto que o potencial nacional de energia solar é privilegiado. O desenvolvimento tecnológico na área de eletrônica de potência é de notável importância para a geração fotovoltaica conectada à rede elétrica.

Uma dificuldade encontrada na tecnologia disponibilizada pelo fabricante nacional é o sistema de aquisição de dados, que apresenta frequentes falhas de conexão e resultados diferentes dos obtidos pela medição direta de créditos. Estas falhas trouxeram a necessidade da leitura diária de geração por meio dos mostradores, e da aproximação em dias em que esta leitura não foi possível.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do INCT-EREEA, Universidade Federal do Pará (UFPA) e Fundação de Amparo ao Desenvolvimento da Pesquisa do Estado do Pará (FAPESPA).

REFERÊNCIAS

- Cavalcante R. L., 2011. Análise operacional de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no campus universitário da UFPA, na cidade de Belém/PA. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará, Belém.
- Macêdo, W. N., 2006. Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado à sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 183 f. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Macêdo, W. N., Cavalcante, R. L., Braga, W. J., Galhardo, M., Pinho, J. T., 2012. Contribuição energética e análise de perdas de conversão c.c.-c.a. em uma aplicação fotovoltaica conectada à rede elétrica na UFPA. IV CBENS - IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, São Paulo.
- Maia, K. C. S., 2011. Monitoração e análise de um sistema de geração individual com fontes intermitentes do tipo fotovoltaico, com disponibilidade energética mensal de 13 kWh. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará, Belém.
- Kyocera Solar KC 120-1 High efficiency multicrystal photovoltaic module. Disponível em <<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5180.pdf>>. Acesso em 18 nov. 2013.

ANALYSIS OF TWO PHOTOVOLTAICS SYSTEMS CONNECTED TO THE GRID GENERATION INSTALLED IN THE LABORATORY OF RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY OF GEDAE

Abstract. *The objective of this paper is to present operational results of two photovoltaic systems connected to the grid in operation at the campus of the Universidade Federal do Pará. One system is operating since November 2012 and the other since December of the same year, both installed at the dependencies of the Laboratory of Renewable Energy and Energy Efficiency of GEDAE. The systems are composed by photovoltaic generators with installed power equal to 1.21 kWp and 1.68 kWp, as well as inverters of different manufacturers, with nominal power equals to 1.0 kW and 1.2 kW, respectively, being the inverter of 1kW of a national manufacturer.*

Key words: *Solar photovoltaic energy, photovoltaic system connected to the grid, performance analysis.*