



ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 11, 2007. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE COM BATERIAS SISTEMA UFPE-BRASIL

Elielza Moura de S. Barbosa, Diego O. Silva, e Rinaldo O. Melo

Universidade Federal de Pernambuco

Av. Prof. Luiz Freire, 1000 CDU, 50 540 740 Recife, PE, Brasil

Tel. 55 081 21268252 – Fax 55 081 21268250 e-mail: elimsb@hotmail.com.br

RESUMEN: Este trabajo presenta una discusión sobre los datos experimentales del estudio del desempeño de lo SFCR-UFPE en operación con almacenamiento de energía. Los resultados obtenidos expresos en medias diarias y mensuales: Energía solar total producida, consumo eléctrico total, contribución solar en el consumo y la energía solar inyectada e la red, apuntan que las condiciones de operación generador / inversor son muy importantes en SFCR con acumuladores de baterías. La utilización de acumuladores, necesaria en algunas situaciones como back-up, puede proporcionar acrecimientos o decrecimientos en la contribución solar en el consumo del usuario en función del modo operacional establecido. En algunas situaciones la cuenta de energía del consumidor puede crecer gracias al aumento de la demanda inversor / batería. El consumo de energía por el acumulador y por el inversor para su propio funcionamiento puede ser mucho mayor en la relación a la energía producida por el generador fotovoltaico, sobretodo cuando el factor de dimensión del inversor nos es adecuado.

PALABRAS CLAVE: sistemas fotovoltaicos conectados a red, sistema solar con baterías, energía fotovoltaica en Brasil

INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil há diversas iniciativas e estudos utilizando o conceito de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) de abastecimento elétrico. No entanto, diferentemente da aplicação fotovoltaica com sistemas autônomos, hoje incorporada como mais uma forma viável de estender o atendimento elétrico a varias regiões do país, as realizações em SFCR situam-se no âmbito de projetos de desenvolvimento (P&D) nas universidades e centros de pesquisas.

Até o ano 2000 existiam cerca de 5 sistemas (7 kWp) com tecnologia SFCR em operação. Uma estimativa recente e promissora, considerando novos sistemas ou a ampliação de sistemas já existentes, resulta em cerca de 80 kWp de SFCR com capacidades variando de 0,85 a 11 kWp instalados e em funcionamento.

Objetivando estudar o comportamento desses sistemas na região Nordeste do Brasil, o Grupo de Pesquisa de Fontes Alternativas da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE-FAE) iniciou os primeiros estudos no ano 2000. Atualmente, conta com três sistemas com diferentes configurações instalados em regiões com características climatológicas diferenciadas: Sistema Golfinho (2,4 kWp; p-Si; com bateria, localizado na Ilha de Fernando de Noronha/Mar Atlântico, clima tropical úmido), Sistema Tucunaré (1,5 kWp; p-Si, em Xingó, região semi-árida do Nordeste: tropical seco) e o Sistema UFPE (1,6 kWp; p-Si; com bateria, cidade do Recife: tropical úmido), (BARBOSA et al., 2006; BARBOSA et al., 2004).

O presente trabalho apresenta uma discussão sobre os dados experimentais provenientes do monitoramento do desempenho do SFCR-UFPE em operação com armazenagem de energia em um banco de baterias. Vale salientar que dentre todos os sistemas atualmente em funcionamento no Brasil, apenas dois operam com armazenagem de energia. Os resultados experimentais foram obtidos considerando uma situação de emergência na qual não se permite interrupções no fornecimento de energia para a carga de um laboratório no período de inverno na cidade do Recife, Nordeste do Brasil.

Os tradicionais parâmetros vêm sendo monitorados: recurso solar, tensão e corrente no banco de baterias e do gerador fotovoltaico, potência elétrica solar total produzida, consumida pela carga e injetada na rede. Os resultados obtidos expressos em médias diárias e mensais: energia solar total produzida, consumo elétrico total, contribuição solar no consumo e a energia solar injetada na rede, mostram que as condições de operação gerador/inversor são muito importantes em SFCR com acumuladores de baterias.

A utilização de acumuladores de energia, necessária em algumas situações como *back-up*, pode proporcionar acréscimo ou decréscimo da contribuição solar no consumo do usuário em função do modo operacional estabelecido. Em algumas situações a conta de energia do consumidor pode aumentar em decorrência do aumento da demanda inversor/bateria. O consumo de energia pelo banco de baterias e pelo inversor para seu próprio funcionamento pode ser muito grande em relação à energia produzida pelo gerador fotovoltaico, principalmente quando o fator de dimensionamento do inversor não é adequado.

ASPECTOS CARACTERÍSTICOS DA APLICAÇÃO DE SFCR

Na geração de energia elétrica via Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), também denominada Mini-central Fotovoltaica, devido à faixa de capacidade de potência nominal utilizada (ordem de dezenas de kWp) os sistemas solares produzem energia que pode atender parte da carga localizada e/ou ser injetada diretamente na rede de serviço de abastecimento elétrico convencional.

Essa associação consumidor-gerador pode trocar energia com a rede: decidir injetar (vender) energia na rede nos momentos em que sua geração é superior ao seu consumo e extrair (comprar) energia da rede no caso contrário, (Lorenzo,1994). Ou seja, a energia gerada pode ou não atender toda a demanda do consumidor, em situação de déficit a oferta é complementada pela rede e em caso de excesso o saldo é repassado à concessionária, gerando créditos para o consumidor.

Há duas configurações básicas de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede: com e sem acumuladores de energia. O modo operacional do gerador solar com baterias (SFCR-B) é semelhante ao sem baterias. Geralmente, um SFCR-B é aplicado como back-up para situações emergenciais e/ou em localidades onde o abastecimento de energia pela rede não apresenta boa qualidade como consequência da pouca capacidade da linha em relação ao consumo. Como solução se propõe um sistema composto pelo gerador fotovoltaico, um inversor e um banco de baterias como sistema de acumulação. Normalmente, o conjunto injeta energia na rede no ponto problemático da rede. A energia é proveniente do gerador durante o dia e do banco de baterias à noite ou na hora de um maior consumo. A recarga da bateria pode ser via o gerador fotovoltaico ou da própria rede, nas horas de menor consumo. Deste modo, o sistema permite diminuir a carga aparente da rede nos momentos de maior consumo. Como consequência, a qualidade do abastecimento de energia elétrica pela rede melhora o que afeta positivamente a economia do sistema. No entanto, em relação ao primeiro o custo com manutenção é bem maior além de gerar um lixo tóxico com a troca do banco de baterias. Por outro lado, pode-se estender a contribuição solar no consumo do usuário.

Além das condições ambientais, clima, recurso solar e temperatura na localidade onde um sistema fotovoltaico é conectado à rede, seu desempenho depende fundamentalmente das características de sua configuração: tipos de tecnologias dos módulos fotovoltaicos e dos inversores.

Dentre os métodos de análise do funcionamento de um SFCR o parâmetro mais utilizado é o rendimento global do sistema ou rendimento energético da instalação, conhecido na literatura técnica internacional como *Performance Ratio* (PR) e expresso em (%). Mas, outros parâmetros e fatores são muito importantes e necessários em uma análise do comportamento técnico de um SFCR.

Normalmente, uma base de dados experimentais é obtida através do monitoramento dos parâmetros e grandezas via um sistema de aquisição de dados, programado para uma determinada taxa de aquisição que registra as medições realizadas por sensores apropriados às grandezas e parâmetros de interesse, tais como:

- Medidas ambientais: irradiação nos planos horizontal e do gerador, temperatura e umidade relativa do ambiente;
- Medidas no sistema: temperatura dos módulos fotovoltaicos, correntes e tensões geradas, potências: ativa, total de consumo, solar consumida pela carga e solar injetada na rede.

Com os valores das medições realizadas pode-se obter como produtos:

- Radiação solar, médias diárias, mensais e anuais nos planos horizontal e do gerador (kWh/m²);
- Variação da temperatura dos módulos fotovoltaicos com a irradiação incidente;
- Energia elétrica produzida de origem solar (kWh), médias diárias, mensais e anuais;
- Energia elétrica de origem solar injetada na rede (kWh), médias diárias, mensais e anuais;
- Energia elétrica consumida e as parcelas de contribuição solar/convencional, médias diárias, mensais e anuais;
- Desempenho energético do sistema em condições reais de operação.

DESCRIÇÃO E OPERAÇÃO DO SFCR-UFPE

O SFCR-UFPE encontra-se instalado no Campus da Universidade Federal de Pernambuco - Brasil na cidade de Recife, 8°S de latitude e longitude de 35°W, de clima tropical úmido, com médias diárias anuais de 27°C de temperatura, 80% de umidade e cerca de 5,0 kWh/m² de radiação média diária .

Inicialmente, o sistema foi configurado com um gerador de 1,6 kWp composto por 20 módulos de silício poli – cristalino (Si-p) de 80Wp e um inversor de 1,0 KVA, para atender a demanda elétrica com computadores e iluminação de um dos laboratórios do Grupo FAE, injetando na rede local o excesso da produção de energia. O arranjo foi montado na forma da sigla da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), instalado a 23°N e 23°W, ocupando uma área útil de 13,4 e 160 kg. Com essa configuração o sistema funcionou muito bem durante algum tempo.

Objetivando estudar o comportamento do sistema numa situação específica, na qual não pode ocorrer falta de energia para alimentar determinada carga, como por exemplo, o setor de vacinas de um centro de saúde, o sistema foi configurado para operar com um banco de baterias com ciclo de carga pelo gerador fotovoltaico ou pela rede. O inversor foi substituído por um disponível de 4 kVA capaz de operar em paralelo com a rede elétrica e aceitar back-up. O gerador fotovoltaico foi reduzido para 1,28 kWp (desativação de um painel de 4 módulos, por dano físico em um dos módulos) e incorporado um banco de baterias de 700 Ah, Fig.1.

O monitoramento do SFCR-UFPE vem sendo realizado por um sistema de aquisição programado para uma taxa de coleta de dados de 1 em 1 segundo. Na Tab.1 constam os parâmetros monitorados, a simbologia, as unidades e os compatíveis sensores utilizados sinalizados no diagrama unifilar mostrado na Fig.2.



Sistema UFPE
SFCR com armazenagem de energia

Localização: Recife -PE/Brasil
Lat. 8^o.Sul; Long. 35^o Oeste

Gerador: 1,28 kWp ; 16 módulos (Si-p);
Tipo KC 80; Arranjo 4x4
Posição 23^oN e 23^oW
Área 10,08 m²; Peso 128 kg

Inversor: 4 kVA; tensão de operação 44-66 Vdc /
120 Vac; 60 Hz

Transformador: 02; 110V/220V/110V

Controlador de Carga: 01; C-40; 40 A / 48 V

Acumulador: 700 Ah; 4 baterias 175 Ah /12 V

Sistema de aquisição de dados: 10 X Campebell

Figura 1- SFCR-UFPE: Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica da Universidade Federal de Pernambuco

Parâmetro /grandeza	Símbolo	Unidade	Sensor / [sinalização do sensor no diagrama]
Corrente do gerador FV	(I_{FV})	[A]	Resistência shunt (50 A - 50 mV) conectada a transdutor de tensão (0 a 50mV; 0,25%) [TrC1]
Corrente do banco de baterias	(I_{Bat})	[A]	Resistência shunt (50 A - 50 mV) conectada a transdutor de tensão bidirecional (-50 a 50 mV; 0,25%) [TrC2]
Tensão do banco de baterias	(U_{Bat})	[V]	Transdutor de tensão (0 a 100 Vcc; +/- 0,25%) [TrT]
Potência ativa (consumo interno)	(P_{AC})	[W]	Transdutor de potencia ativa (220V 5 A; 0 a 4000 W; 1%) [TrP1]
Potência fornecida pela rede concessionária	(P_R)	[W]	Transdutor de potencia ativa (220V 5 A; - 4000 a 4000 W; 1%) [TrP2]
Temperaturas no gerador FV	(T_{Amb} ; T_{FV})	[C°]	Estação solarimetrica Campebell; Sensor LM35 [Temp. FV]
Irradiações incidentes nos planos: horizontal e do gerador	(I_{Hz} ; I_{β})	[W/m ²]	Estação solarimétrica Campebell; Sensor Li-cor 200SA (10%) [H FV]

Tabela 1- Relação dos parâmetros monitorados no SFCR-UFPE

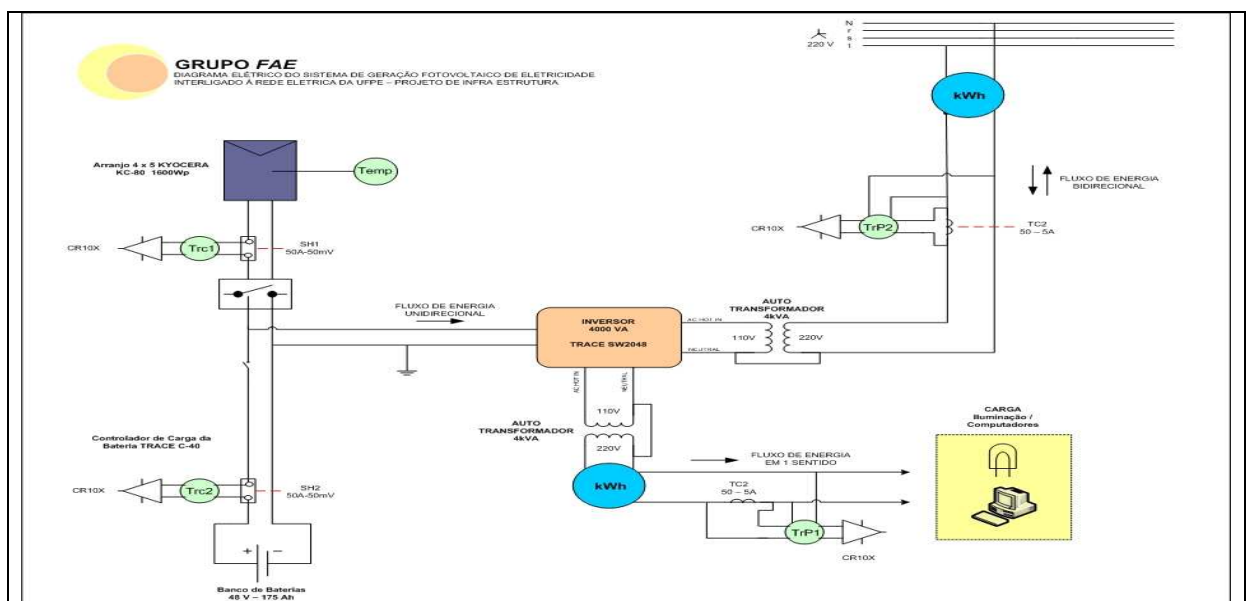


Figura 2- SFCR- UFPE Diagrama monofilar com sinalização das localizações dos sensores utilizados no monitoramento

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A configuração em foco do SFCR-UFPE apresenta um Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) igual a 3,1. O FDI é definido como a relação entre as capacidades nominais do inversor e do gerador. Valor bastante desfavorável. Normalmente, em SFCR, se utiliza um gerador com capacidade maior que a do inversor. Segundo Macedo (2006), no Brasil a máxima produtividade de SFCR é obtida para valores do FDI na faixa de 0,6 a 1,1.

O modo operacional estabelece que o banco de baterias esteja sempre carregado para atendimento à carga em situações emergenciais. O ciclo de carga pode ser realizado com energia proveniente do gerador solar ou da rede.

Os resultados experimentais obtidos são exemplificados graficamente para os meses de maio a agosto/07, período de inverno no Recife e, portanto mais crítico em relação ao recurso solar.

Irradiação Solar

Os dados experimentais das irradiações nos dois planos, horizontal e do gerador, são mostrados como radiações médias diárias mensais, Fig. 3. Os valores da radiação horizontal quando comparados aos valores originados de séries históricas (Tiba et al., 2000), apresentam boa concordância: 3,4; 4,0 e 4,4 kWh/m² contra 4,0; 4,0 e 5,1 para os meses de junho a agosto respectivamente. Durante quase todo mês de agosto/07 o céu de Recife esteve sempre nublado. Os valores obtidos para a radiação no plano do gerador são similares (diferenças dentro do erro experimental do sensor utilizado). Portanto, pode-se considerar uma radiação média diária mensal de cerca de 4,0 kWh/m².dia para os três meses.

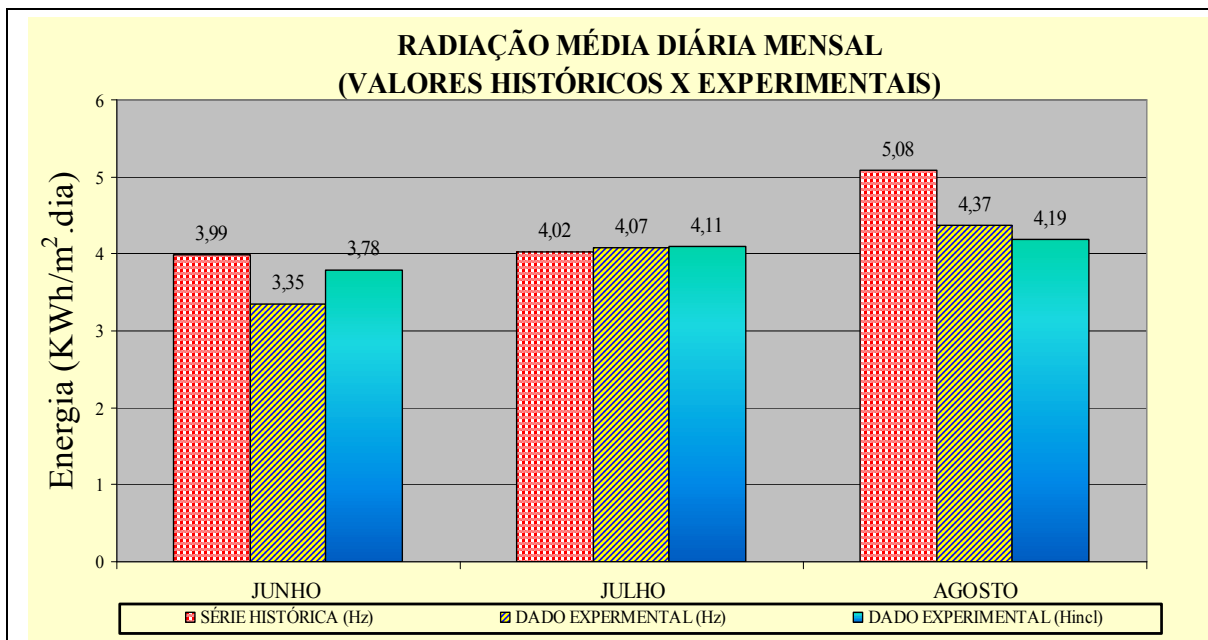


Figura 3 –Recife-PE/Brasil (8^o Sul; 35^o Oeste): Radiação média diária mensal nos planos horizontal e do gerador FV (23^o)

Energia elétrica produzida, consumida e injetada na rede.

A energia elétrica produzida pelo gerador fotovoltaico de 1,28 kWp, calculada como o produto dos dados experimentais da corrente e da tensão de operação do gerador apresenta valores similares para os três meses (3,5; 4,0 e 3,4 kWh). Resultando, em um valor médio diário mensal de 3,64 kWh. Os valores mostram uma boa concordância com os valores estimados, considerando a radiação incidente no plano do gerador e uma eficiência de 10% (módulos Si-p) como exemplifica o gráfico, Fig. 4a. A variação da eficiência com a irradiação incidente acusa 8 a 8,5% como eficiência média no intervalo de 200 a 1000 W/m², Fig.4b. Valor bem abaixo dos dados de catálogo (10 a 13%) para módulos comerciais de (Si-p). O efeito da radiação na temperatura do gerador pode justificar esse resultado. Mesmo no período de inverno a temperatura do gerador atinge cerca de 23 °C acima da temperatura ambiente, Fig. 4c.

O balanço energético global foi realizado entre as energias: produzida pelo SFCR-UFPE, consumida proveniente da rede, consumida pela carga, injetada na rede, consumida no ciclo de carga da bateria e a energia líquida na saída do inversor. Os resultados, para julho e agosto em kWh/mês, são mostrados na Fig.5. O mês de junho é similar a julho. Observa-se que:

1. O consumo de energia pela carga (demanda do laboratório) foi de 168, 136 e 199 kWh/mês. Média de 168 kW/mês;
2. O consumo de energia proveniente da rede convencional (conta de energia) foi de 188, 129 e 222 kWh/mês. Média de 180 kW/mês;

3. A contribuição solar no abastecimento de energia foi de 61, 78 e 55 kWh/mês. Média de 65 kW/mês;
4. O consumo de energia para o carregamento do banco de baterias foi de 81, 70 e 79 kWh/mês. Média de 77 kW/mês.

Portanto:

5. Não ocorreu injeção de energia solar na rede em nenhum dos três meses. Análises diárias mostram que a injeção só ocorre em termos instantâneos durante o dia com o sol presente. Ou seja, a energia produzida pelo gerador solar, em termos instantâneos, durante o dia, pode ser maior que a energia que está sendo consumida naquele instante pela carga do laboratório sendo capaz de suprir o consumo do laboratório e injetar o saldo na rede convencional a cada instante. No entanto, durante a noite a energia consumida, pelo banco de baterias e pelo inversor, proveniente da rede convencional, pode se superior a quantidade total injetada na rede durante o dia, resultando num balanço negativo.
6. Não houve contribuição solar para redução da conta de energia nos meses de junho e agosto. No mês de julho ocorreu a contribuição de cerca de 8 kWh/mês;
7. No trimestre, o saldo é negativo. Cerca de 12 kWh foram consumidos a mais em decorrência do modo operacional do sistema, programado para que o banco de baterias esteja sempre carregado independente da origem da energia (solar ou rede)

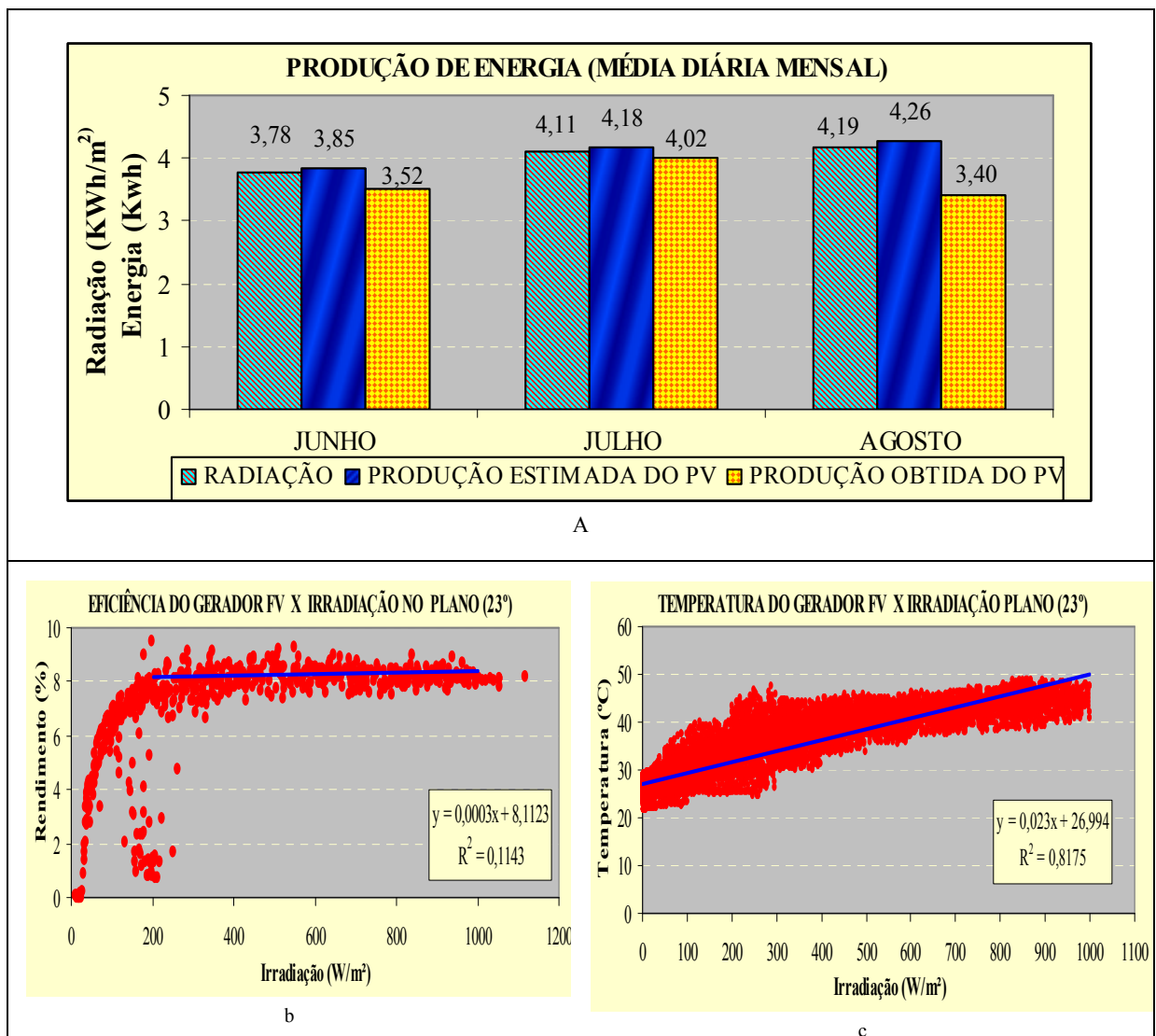
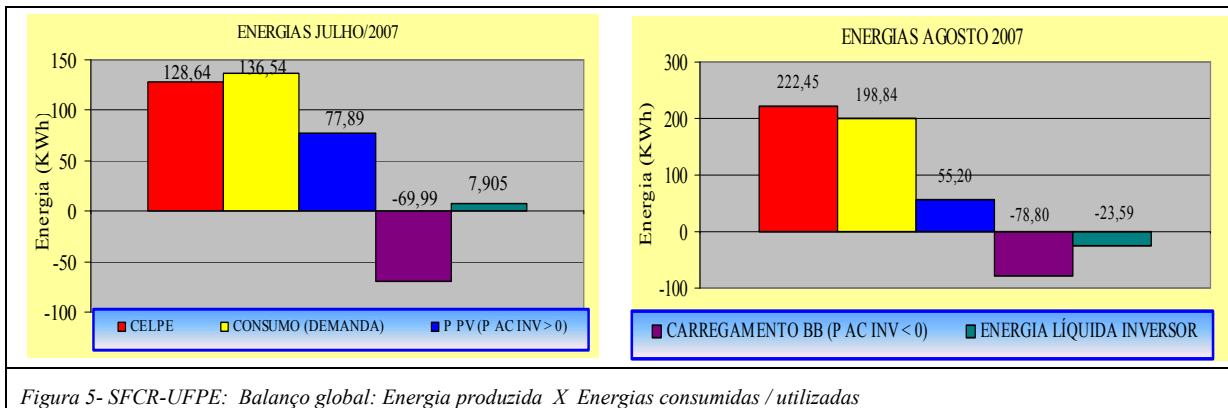


Figura 4- SFCR-UFPE: a) Energia produzida e Radiação no gerador; b) Eficiência do gerador X Irradiação; c) Temperatura do gerador X Irradiação



A modalidade de funcionamento do SFCR-UFPE fica mais evidente quando se observam resultados diários. A Fig.6a mostra graficamente o comportamento dos fluxos de energia durante as 24 horas do dia 04/agosto/07 (Juliano 216), que apresentou 4,5 kWh/m² no plano do gerador. Na Fig.6b consta a representação do balanço energético deste dia. Observa-se que:

Período Diurno: período do dia (07:00 às 16:00h)

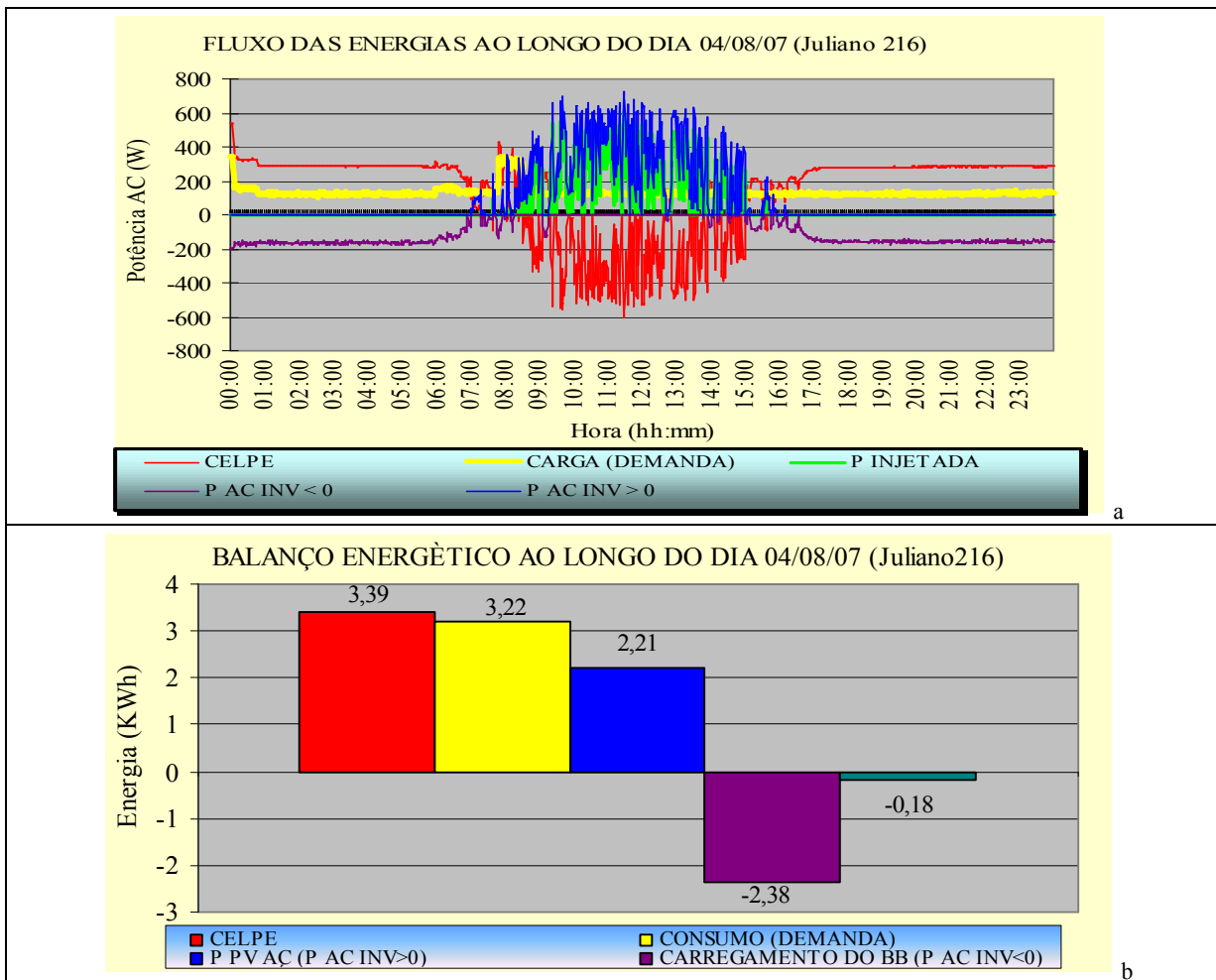
1. Foi gerado cerca de 2,1
2. A demanda consumiu 1,27 kWh
3. 0,83 kWh injetados na rede. Portanto foi deixado de ser consumido da rede 0,83 kWh

No período Noturno: período do dia (16:00 às 07:00h)

4. A demanda consumiu 1,29 kWh
5. O consumo de energia proveniente da rede foi de 4,22 kWh
6. O carregamento do banco bateria consumiu 2,27 kWh

Portanto, nesse dia:

Houve um consumo de energia da rede de 3,39 kWh, enquanto a carga só foi de 3,22 kWh. O saldo negativo de 0,18 kWh corresponde ao carregamento do banco de baterias.



Eficiências do gerador, inversor e global.

O valor da eficiência do gerador de 8% pode ser justificado pela variação da temperatura do módulo com a radiação, como mostrado na Fig. 4c.

O SFCR-UFPE opera com um banco de baterias que deve permanecer sempre carregado. Apresenta um FDI = 3,1. Ou seja, a capacidade do inversor é muito maior do que a capacidade nominal do gerador, uma grande desvantagem. Além desses fatos, inerente às condições e decisões de projeto, salienta-se a dependência da eficiência do inversor com a radiação e com a capacidade da carga como mostra os dados na Fig. 7a. O teste foi realizado para duas capacidades de cargas resistivas 500 e 1000 W. Observa-se que a eficiência aumenta com o índice de irradiação solar atingindo um patamar para níveis acima de 600 W/m². A capacidade da carga também interfere na eficiência do inversor que decai com seu aumento. Ocorrência esperada e prevista no catálogo do equipamento. No entanto, a comparação entre os dados de catálogo e os experimentais mostra valores da eficiência do inversor em função da carga menores de cerca de 20%, Fig.6b.

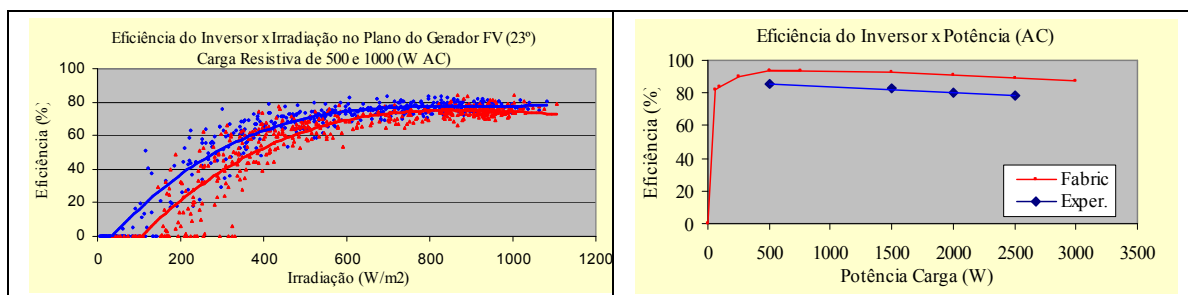


Figura 7- SFCR-UFPE: Eficiência do inversor a) em função da irradiação e da capacidade da carga; b) comparação entre dados experimentais e de catálogo.

Concluindo, o SFCR-UFPE apresenta a vantagem de disponibilizar sempre uma energia de back-up para situações emergências. Do ponto de vista de redução da conta de energia do usuário, injeção de energia solar na rede, seu desempenho deixa a desejar. Os resultados obtidos decorrem, principalmente, da relação entre as capacidades nominais do inversor e do gerador desfavorável junto à modalidade operacional do sistema com back-up sempre pronto para atuar.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, E. M. de S., Melo, R. de O., Tiba, C. (2006). The First grid-connected photovoltaic system in Federal University of Pernambuco-Brazil. World Renewable Energy Congress – WREC-2006, n° PV95, Florença Itália, Agosto 2006.
- Barbosa, E. M. de S., Lopes, L. G. C., Tiba, C. (2004). Sistemas fotovoltaicos interligados à rede no Arquipélago Fernando de Noronha. XII Congresso Ibérico e VII Iberoamericano de Energia Solar –CIES. Vigo, Espanha, Setembro, 2004
- Lorenzo, E., Eletricidad solar. Ingenieria de los sistemas fotovoltaicos. (1994). Artes Gráficas Gala, S.L. 1ª. Edição. ISBN: 84-86505-45-3, 1994
- Macedo, W. N. (2006). Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Tese de Doutorado. Instituto de Eletrotecnica e Energia, Universidade de São Paulo, 2006.
- Tiba, C., Gross, H., Fradenraich, N., Lyra, F. M. (2000). Atlas solarimétrico do Brasil-Banco de dados terrestre. Recife, Brasil. Ed. Universitária UFPE, 2000.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos do Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Pernambuco. O projeto encontra-se inserido dentro do CT-INFRA- MCT

ABSTRACT. This work presents an evaluation of the monitored data of a grid connected system with battery installed in the Federal University of Pernambuco (1.28 kWp). The battery can be charging for photovoltaic system or by electrical network. The traditional parameters are being monitored: solar resource, battery bank tension and current, current in the photovoltaic generator and solar electrical energy produced. The following data was determined: daily average and daily monthly average solar irradiation in the horizontal and in the generator plane; the electrical current of the photovoltaic modules with the incident irradiation on the his plane; electrical energy produced of solar origin, electrical energy of solar origin injected into the network, consumed electrical energy, parcels of solar/conventional contribution. The results show that: the inverter operation conditions are very important in the situation with battery. The charge time period is programmed and monitored for the inverter. The solar energy contribution decreases if the battery charge time period is inadequate. The consumption energy inverter for his own operation and for charge the battery was very large relative to active power produced for the generator.

KEY WORDS: grid connected photovoltaic system, solar system with battery, photovoltaic energy in the Brazil