

POTENCIAL TÉCNICO DE SFCR - DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE POTENCIA ESPECIFICA PARA A REGIÃO URBANA DE RECIFE

Elielza Moura de Souza Barbosa, Fernando Roberto de Andrade Lima, Osvaldo Soliano Pereira.

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear
Grupo de Fontes Alternativas de Energia
Av Prof. Luiz Freire, 1000- CDU Recife PE Brasil CEP 50.740.540
elimsb@hotmail.com.br

RESUMEN: El trabajo presenta la determinación de la densidad de potencia específica de áreas para la instalación de Sistemas Fotovoltaicos Conectado a Red (SFCR). La evaluación de la producción de la energía útil tiene como base fundamental resultados del procedimiento de operación de un SFCR-Prueba de (p-Si) instalado en el Campus de la Universidad Federal de Pernambuco, Recife, Noroeste del Brasil. Los datos obtenidos durante el monitoreo anual de este sistema permiten calcular la eficacia del mismo y la de sus componentes en condiciones reales de operación (radiación, temperaturas ambiente y de la operación). Se obtienen valores más realistas del coeficiente global del funcionamiento (*PR-Performance Ratio*). Los resultados acusan un valor medio anual de 0.7 para el PR y de 156 kW/m² como energía específica. Teniendo en cuenta estos resultados, SFCR pueden ser proyectados a partir de la demanda que deberá ser provista y/o del área disponible. Por ejemplo, en un techo de fotovoltaicos de 100m² se podrá producir unos 15.6 MWh/año, energía útil apta para abastecer la demanda de unas 4 residencias con consumo de entre 300 al 430 kWh/mes.

PALABRAS CLAVE: Sistemas Fotovoltaicos conectados a red, Techo solar, Generación eléctrica descentralizada, Performance del sistemas; Densidad de potencia específica.

INTRODUÇÃO

A avaliação do potencial de geração de energia elétrica por sistemas fotovoltaicos envolve o conhecimento prévio de diversos parâmetros relacionados a três potências: O *Potencial Físico*, representado pelo recurso solar, envolve informações climatológicas e meteorológicas e apresenta como produtos principais os índices de radiação incidente e de temperatura ambiente. O *Potencial Geográfico* relacionado com a disponibilidade de área para a instalação de sistemas. O *Potencial Técnico* fundamentado em informações técnicas relativas aos equipamentos e ao sistema e que apresenta como produtos decisórios o desempenho global do sistema e a energia específica produzida.

Especificamente, para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), uma metodologia de avaliação do seu potencial em telhados foi desenvolvida por Barbosa, (2009). Nesse estudo, os potenciais citados são tratados como ambientes e mais dois novos ambientes são incorporados: o Ambiente Econômico, relacionado aos aspectos econômico-financeiros e o Ambiente Analítico que associa todas as informações fornecendo, como resultado, estimativas da potencialidade de SFCR em centros urbanos, particularmente para sistemas localizados em coberturas de edificações, situação no qual são denominados de Telhados Solares ou Telhados Fotovoltaicos.

O presente trabalho aborda, especificamente, o *Potencial Técnico*. Descreve os procedimentos que podem ser utilizados para a determinação da energia útil produzida por SFCR, entre esses o método baseado em dados experimentais do acompanhamento anual do desempenho do sistema em condições reais de operação. A metodologia é desenvolvida tendo como estudo de caso a região urbana da Cidade do Recife. Os resultados experimentais obtidos de um Sistema-Teste são analisados em base anual e a partir da energia útil produzida e de séries históricas de índices de radiação solar a densidade de potencia específica para a cidade do Recife é determinada.

Os resultados provenientes da avaliação anual, expressos como valores médios (diária mensal anual), mostram que o excelente potencial solar para a Cidade do Recife resulta numa densidade de energia específica da ordem de 156 kWh/m². Ou seja, um SFCR de pequeno porte, por exemplo, de 100 m², quando instalado corretamente, pode produzir e injetar na rede elétrica cerca de 15,60 MWh/ano. Energia compatível, por exemplo, com a demanda de eletricidade anual de quatro residências de padrão de consumo médio de 325 kWh/mês.

POTENCIAL TÉCNICO PARA SFCR

Normalmente, o Potencial Técnico é estimado via modelos de simulação utilizando-se os dados do recurso solar, (Potencial Físico) e dados técnicos de catálogos de equipamentos. Estudos mais recentes utilizam, nos modelos de simulação, dados de fatores de desempenho global de sistemas FV provenientes de bases de dados operacionais de sistemas em funcionamento.

Na presente proposta a avaliação da produção de energia tem, como base fundamental, dados proveniente da avaliação técnica de um SFCR-Teste instalado no Campus da Universidade Federal de Pernambuco. Os resultados obtidos do

monitoramento anual, desse sistema, permitem calcular a eficiência do sistema e de seus componentes em reais condições de operação, resultando em valores mais realistas do coeficiente global de desempenho e da densidade de potência específica.

Procedimentos de Avaliação Técnica de SFCR

Dentre os métodos de análises técnicas de desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), o parâmetro de avaliação final é o desempenho global do sistema, conhecido na literatura técnica internacional como *Performance Ratio* (PR). O Fator PR considera as reais condições de operação e todos os fatores que influem na eficiência global do sistema como: condições ambientais (disponibilidade e qualidade do recurso solar, temperatura e umidade do ar, direção e velocidade do vento); condições de posicionamento do sistema (direção, orientação e inclinação); tipos de tecnologias das células fotovoltaicas (Silício-cristalino ou amorfo e Filme finos de Telureto de Cádmio, entre outros); características técnicas individuais e em conjunto dos componentes (geradores, inversores); fatores de perdas (ôhmicas, descasamento) e as características de conexão do sistema com a rede elétrica convencional.

Há dois procedimentos principais de monitoração reconhecidos e que constam nos “manuais de regulamentação”: Ispra Guidelines - Report EUR 16339 EN e IEC 61724, O primeiro segue um método de monitoramento analítico e o segundo estabelece normas e diretrizes para analisar o desempenho do sistema através da monitoração de dados experimentais, (Mondol et al., 2006). Referências mais recentes, sobre a normalização vigente aplicada na União Européia, são reportadas em Dávila et al., (2004), no Difusion IDAE, (2002) e no Relatório FSEC-GP-70-01, (2002).

Segundo esses procedimentos; a análise técnica necessita de elementos provenientes do acompanhamento temporal das ocorrências de cada um dos parâmetros e condições envolvidas no desempenho do sistema e os resultados são expressos como valores totais ou médios, relativos a um determinado período de monitoramento.

Os resultados, em longo prazo, devem ser expressos como médias anuais. As seguintes grandezas são monitoradas: Irradiação solar nos dois planos, horizontal e inclinado do gerador, (h_h ; h_{fv}) em [W/m^2]; Temperatura ambiente e de operação do gerador FV, (T_{amb} ; T_{fv}) em [$^{\circ}C$]; Corrente elétrica gerada na saída do gerador FV (I_{fv}) em [Acc]; Tensão de operação no inversor, (U_{fv}) em [Vcc]; Potência elétrica gerada pelo arranjo FV, (P_{fv}), em [Wcc]; Potência elétrica solar útil, produzida na saída do inversor (P_a), em [Wca]; Potência elétrica total consumida pela demanda, (P_c) em [Wca]; Potência elétrica consumida da rede de abastecimento de energia, ($P_{c,red}$) em [Wca].

Com os valores instantâneos medidos, os seguintes parâmetros podem ser determinados e expressos como valores totais ou médios: média horária diária (valor médio diário, d), diária mensal (valor médio mensal, m) e mensal anual (valor médio anual, a): Radiação solar nos planos, horizontal e do gerador FV, em valores totais como ($H_{fv,d}$, $H_{fv,m}$, $H_{fv,a}$) ou em valores médios como: ($\overline{H}_{fv,d}$, $\overline{H}_{fv,m}$, $\overline{H}_{fv,a}$) em [kWh/m².d]; As energias em [kWh/d]: solar coletada no plano do gerador FV (E_{col}); elétrica gerada pelo gerador FV, (\overline{E}_{fv}); elétrica produzida pelo sistema FV, (\overline{E}_a); elétrica consumida pela demanda, (\overline{E}_c); elétrica solar injetada na rede, (\overline{E}_{inj}); elétrica consumida com as parcelas da contribuição solar e da rede, ($\overline{E}_{c,sol}$; $\overline{E}_{c,red}$).

Os valores médios em um período são calculados como exemplificado a seguir para a radiação no plano do gerador e a energia coletada (média diária):

$$\overline{H}_{fv,d} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{t=N} h_{fv,t} \cdot \Delta t \quad (1)$$

$$\overline{E}_{col,d} = A_a \times \overline{H}_{fv,d} \quad (2)$$

Onde ($h_{fv,t}$) corresponde aos valores instantâneos medidos da irradiação solar no plano do arranjo FV no período (t) da taxa de aquisição de dados, (N) é o número de ocorrências no dia (d) e (A_a) é a área do gerador fotovoltaico. O mesmo procedimento é adotado para os demais parâmetros.

A partir desses valores, os seguintes parâmetros de avaliação podem ser determinados e utilizados para a análise do desempenho global do sistema, (FSEC-GP-70-01, 2002, apud Mondol et al.,2006): Eficiências médias do gerador FV ($\overline{\eta}_{fv}$), do inversor ($\overline{\eta}_{inv}$) e do sistema ($\overline{\eta}_s$); Índice de Produtividade em (h/d ou kWh/kWp), definidos como: de Referência (\overline{Y}_r) - relação entre a irradiação diária incidente no plano do gerador fotovoltaico e a irradiação em condições (STC). Indica a energia teórica disponível por dia por kWp instalado ou quanto tempo seria necessário para que o sistema tenha a mesma produção quando submetido à condição de radiação de 1 kW; do Arranjo Fotovoltaico (\overline{Y}_a) - relação entre a energia fotovoltaica gerada e sua potência nominal em condições (STC, que indica quanto tempo de operação o arranjo fotovoltaico

necessita operar, com a potência nominal, para gerar a mesma quantidade de energia; e *final do sistema* (\bar{Y}_f) - relação entre a energia efetivamente útil e a potência nominal em (STC). Indica a produtividade do sistema em relação à sua potência nominal. Representa a energia injetada ou consumida pelo usuário durante certo intervalo de tempo ou o número de horas que o sistema necessita operar, na potência nominal, para fornecer a mesma quantidade de energia produzida; o *Fator de Desempenho ou Rendimento Global* (PR) - representa a eficiência da instalação em reais condições de operação e considera todos os fatores que influem na eficiência global: tipo de células, dependência da eficiência de gerador e inversor com a temperatura, perdas por descasamento entre módulos e perdas ôhmicas, eficiência energética do inversor, relação entre as capacidades nominais do inversor e do gerador entre outras e as *Perdas no sistema* relativas às perdas durante a conversão de CC/CA (\bar{L}_s), e perdas na coleção da radiação (\bar{L}_c), relativas às perdas na captação da irradiação pelo aumento da temperatura dos módulos, problemas na orientação do gerador e outros fatores que contribuem para diminuir a quantidade de energia coletada/gerada pelo arranjo FV;

CASO ESTUDO – CIDADE DO RECIFE

Apresenta-se a seguir o estudo de caso para a região urbano da Cidade do Recife. No entanto, os procedimentos aplicados não são restritivos a localidade, podendo ser utilizados para outros espaços desde que alguns parâmetros e condições sejam ajustados ou redefinidos em função dos dados referentes ao Potencial Físico da localidade-foco.

Estudo Experimental – Avaliação Técnica do Sistema-Teste

O sistema-teste, em foco, (SFCR-UFPE-III), apresenta-se com 1,28 kWp, sem acumulação de energia e com um Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) de 0,9, valor dentro da faixa considerada ideal para SFCR localizados na cidade de Recife, (Macedo, 2006). É constituído pelo gerador FV (16 módulos de Silício poli cristalino de 80 Wp), o inversor (com seguidor do ponto de máxima potência) e comandado por um quadro de controle com um sistema de aquisição de dados. A energia produzida supre parte do consumo de um dos laboratórios da área de Testes FAE. O arranjo foi instalado, inclinado a 23° faceando o Norte Verdadeiro, interligando-se os 16 módulos em série e proporcionando, em condições STC, valores de 1,28 kWp, 4,74 A e 270,4 V no ponto de máxima potência do arranjo fotovoltaico. Essa configuração (interligação em série) proporciona que o gerador trabalhe dentro das condições impostas pelo inversor: tensão de operação 139-400 Vcc e corrente máxima de 10 A. O sistema de aquisição de dados, tipo CR 1000 da Campbell, monitora os parâmetros elétricos e meteorológicos desde a captação do recurso solar, passando pela geração até a produção de energia útil e as energias, fornecida pela rede local e consumida pela carga. Cada variável envolvida é medida individualmente por sensores apropriados. As ocorrências são registradas a cada minuto e armazenadas para posterior tratamento em termos de médias diária, mensal e anual.

Resultados Experimentais

Os principais resultados, obtidos para o período de 1 ano, novembro/2007 a outubro/2008, de monitoramento do sistema-teste, SFCR- UFPE III, são mostrados nas figuras seguintes e ratificam os anteriormente apresentados no estudo preliminar durante os primeiros três meses de operação do sistema, Barbosa, (2008). A análise foi realizada em 73% dos dias observados, 262 dias que apresentaram dados consistentes.

1- Radiação Solar e Geração Fotovoltaica (cc)

Os resultados obtidos como médias diárias mensais da radiação incidente no plano do gerador ($\bar{H}_{fv,m}$) são mostrados na Figura 1a. Valores na faixa de 4,0 a 6,0 kWh/m².dia foram verificados, resultando em uma radiação de 4,73 kWh/m².d como média diária mensal anual.

O excelente potencial solar para a região da Cidade do Recife, caracterizado não só pelo nível quantitativo, mas também pela uniformidade ao longo dos meses, pode ser observado na Figura 1b, que mostra a frequência de distribuição normalizada dos valores médios diários da radiação incidente no plano FV sobre todo o período observado: 76 % do total de dias observados, os valores da radiação incidente no plano do gerador são maiores que 4,0 kWh/m².d, sendo que em 34% dos dias os valores são maiores que 5,0 kWh/m².d; A maior incidência (42%) ocorre para valores maiores que 4,0 e menores ou iguais a 5,0 kWh/m².d; Valores maiores que 6,0 kWh/m².d ou menores ou iguais a 3,0 kWh/m².d representam apenas cerca de 5% e 6%, respectivamente.

Comparativamente, a Figura 1a mostra os valores médios diários mensais das energias coletadas, geradas e da eficiência do gerador. Em termos de médias mensais anuais, os valores obtidos são respectivamente de 48,26 kWh/d e de 5,05 kWh/d. A frequência de distribuição normalizada dos valores médios diários da energia gerada é mostrada também na Figura 1b. Observa-se que: em 74 % dos dias, os valores são maiores que 4,0 kWh/dia e em 26 %, menores ou iguais; 46% dos dias apresentam valores acima de 5,0 kWh/d, e em 29 %, os resultados são maiores que 5,5 kWh/d; Apenas, cerca de 10 % e 6 % dos dias apresentam valores menores que 3,0 kWh/d e maiores que 6,0 kWh/d. Esses resultados implicam em valores de eficiências do gerador FV médios mensais entre o mínimo de 7,8 % (junho) e o máximo de 12 % (fevereiro) e de 10,5% como valor médio mensal anual, Figura 1a.

O efeito da irradiação incidente sobre a temperatura do gerador FV pode ser observado no gráfico da Figura 1c. Os valores representados correspondem a medições instantâneas da irradiação incidente e da temperatura do gerador FV. Os dados estão agrupados por faixa de incidência da irradiação e, os valores da temperatura do gerador correspondem ao valor médio das

medições em três pontos (um central e dois nos extremos) do arranjo FV. Observa-se que a temperatura do gerador FV aumenta, proporcionalmente, com a radiação incidente no seu plano, como indica a regressão linear mostrado na Figura 1c. Esse resultado concorda com os obtidos em vários outros experimentos e comprovam, no caso de módulos de Silício em clima tropical, uma relação linear do tipo $(T_{op} - T_{amb} = C I_{fv})$, onde C situa-se na faixa de 0,02 a 0,03, (Barbosa et al., 2007).

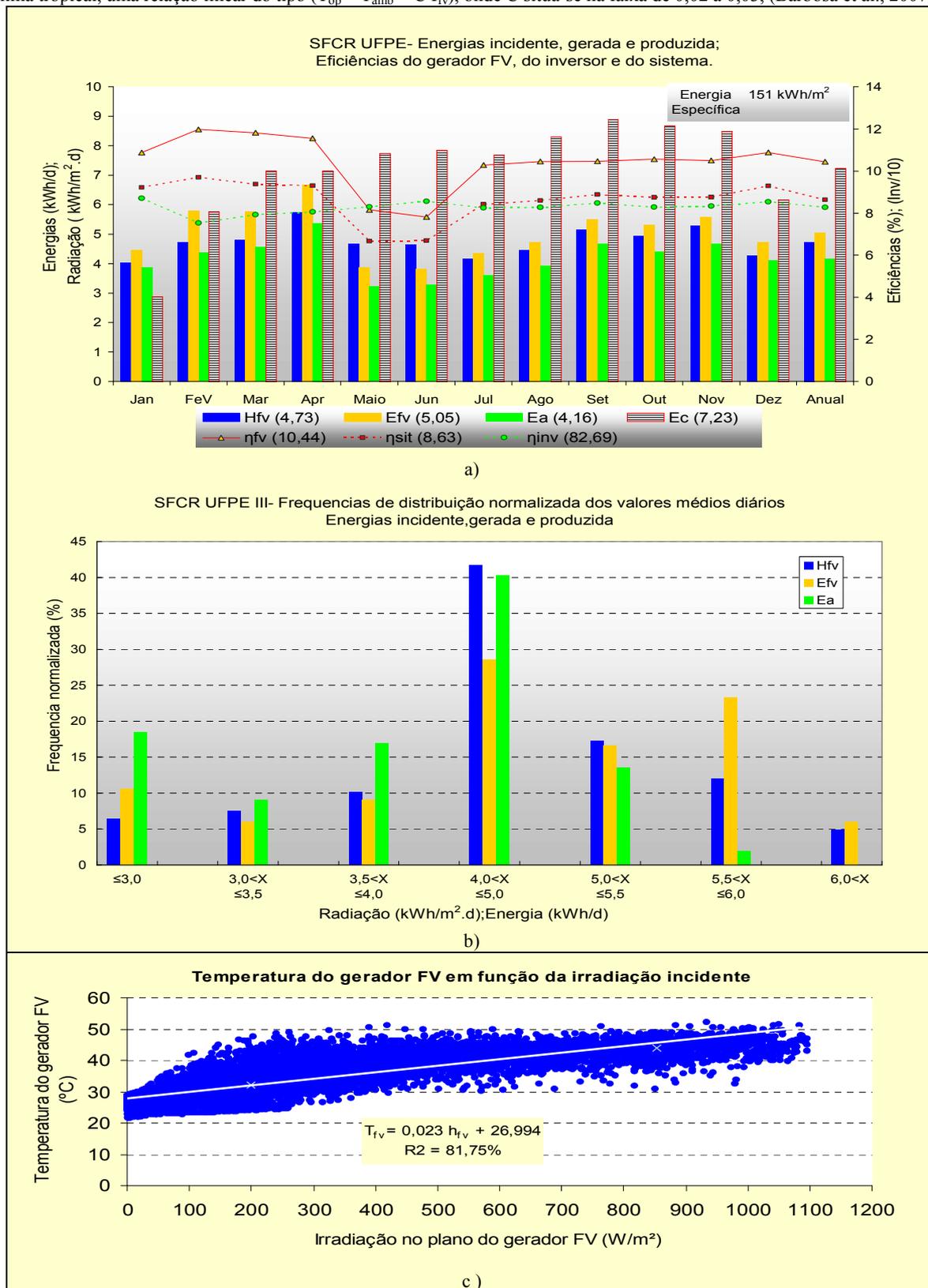


Figura 1: Sistema-Teste (SFCR UFPE III): a) Energias: radiação incidente no plano FV, gerada, produzida e consumida; Eficiências do gerador, do inversor e do sistema, valores como médias diárias mensais e anuais; b) Frequências normalizadas dos valores das médias diárias das energias incidente, gerada e produzida; c) Efeito da irradiação na temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos.

Esse efeito pode justificar as diferenças encontradas entre os valores da eficiência do gerador obtidos experimentalmente e os dados de catálogo do fabricante, tipicamente de eficiências de 12 a 12,5 % em STC ($1,0 \text{ kW/m}^2$; 25°C). Devido à interdependência existente entre o nível de irradiação incidente sobre um gerador FV com a sua temperatura de operação e a potência gerada (corrente elétrica gerada versus a sua tensão de operação), por conseguinte com sua eficiência.

2- Geração fotovoltaica e produção de energia (ca)

Os resultados obtidos referentes à energia produzida e a eficiência do inversor são comparativamente também mostrados na Figura 1a. Os valores obtidos para a eficiência do inversor situam-se, em termos de médias diárias, na faixa de 75,3 a 85,6 %, com valor médio anual de 82,70%. Resultados bem menores que os valores informados pelo fabricante (95%).

Os resultados experimentais mostram também que o inversor em operação apresenta um nível crítico de irradiação de cerca de 50 W/m^2 e um autoconsumo de energia menor que $0,5 \text{ kWh/d}$.

A produção de energia útil (E_a) resultou em valores na faixa de 3,22 a $5,37 \text{ kWh/d}$, médias mensais, com $4,16 \text{ kWh/d}$ como média anual, dados também apresentados na Figura 1a.

A ocorrência dos valores médios diários da energia produzida mostra que: 72,6 % dos dias observados os valores da energia útil produzida são maiores que $3,5 \text{ kWh}$ e menores que $6,0 \text{ kWh}$; 27,4 % dos dados são iguais ou menores que $3,5 \text{ kWh}$; Não há ocorrências de valores iguais ou superiores a $6,0 \text{ kWh}$; A grande maioria dos valores (54 %) são maiores que $4,0 \text{ kWh}$ e menores ou iguais a $5,5 \text{ kWh}$.

O SFCR UFPE III encontra-se conectado em uma das fases da rede elétrica local, que tem um baixo consumo na faixa de 2,0 a 15 kWh/d , com aproximadamente $7,0 \text{ kWh/d}$ como valor médio diário mensal, função do ritmo de atividades no laboratório FAE, predominantemente diurnas. Verifica-se que, em cerca de 24 % dos dias analisados, o SFCR-UFPE-III supre 100% da demanda e disponibiliza o saldo para ser injetado na rede elétrica local. Em termos de balanços mensais, observa-se que em 11 meses não há saldo de energia disponível para ser injetado na rede convencional. Com exceção de janeiro/08, mês de férias, onde praticamente a produção diária de eletricidade solar corresponde à demanda de energia do laboratório, como pode ser observado também na Figura 1a, em todos os outros meses, houve necessidade de suprir parte da demanda com energia da rede.

3- Índices Operacionais do Sistema-teste (SFCR UFPE III)

Os resultados para os Índices de Produtividade, de Referência, do Arranjo, Final do Sistema e, do Fator Global de Desempenho são apresentados na Figura 2.

Os valores das frequências de ocorrências dos valores médios diários obtidos para os citados parâmetros mostram que, Figura 2a: Para a Produtividade de Referência (Y_r), a grande maioria dos valores (62 %) são maiores que $3,0 \text{ h/d}$ e menores ou iguais a $4,0 \text{ h/d}$. Apenas, cerca de 9% são superiores a $5,0 \text{ h/d}$ e iguais ou inferiores a $6,0 \text{ h/d}$; Cerca de 60 % dos valores referentes à Produtividade do Arranjo FV (Y_a) são maiores que $3,0 \text{ h/d}$ e menores ou iguais a $5,0 \text{ h/d}$. 20% são inferiores ou iguais a $3,0 \text{ h/d}$ e apenas 1,5% superiores a $5,5 \text{ h/d}$; Para a Produtividade Final (Y_p), quase a totalidade dos valores (91%) são menores ou iguais a 4 h/d , ou seja, em 91% dos dias analisados, o sistema necessitaria no máximo 4 h/d com 1 kW/m^2 de irradiação incidente para produzir a mesma quantidade de energia entregue à carga nas condições reais de operação; Cerca de 80 % dos valores médios diários do Fator Global de Desempenho são maiores que 0,65 e menores que 0,8.

Resultando, em termos de valores médios mensais e médios anuais: Produtividade de Referência na faixa de 4,15 a $5,73 \text{ h/d}$, com valor médio anual de $4,75 \text{ h/d}$; Produtividade do Arranjo FV entre 3,0 a $5,2 \text{ h/d}$, com valor médio anual de $4,01 \text{ h/d}$; Produtividade Final do sistema entre 2,5 a $3,7 \text{ h/d}$, com valor médio anual de $3,27 \text{ h/d}$. A média anual expressa em termos de kWh/kWp , resulta em 1.187 kWh/kWp ; Fator Global de Desempenho do sistema entre 0,53 a 0,78, com valor médio anual de 0,69. As perdas no gerador (L_c) e no inversor (L_s) resultaram aproximadamente iguais, cerca de 0,73 e $0,75 \text{ kW}$, respectivamente

Os valores de (PR) obtidos são compatíveis com os citados na literatura para SFCR de pequeno porte. Por exemplo, na avaliação de 174 sistemas da base de dados PVSP-TASK 2, realizada por Jahn et al., (2000) acusam (PR) na faixa de 0,25 a 0,9 com valor médio de 0,66. Os autores alertaram que a tendência dos valores de (PR) seria de aumentar com manutenção adequada e equipamentos de melhor qualidade tecnológica. Realmente, avaliações mais recentes realizadas por Jahn et al., (2004) e Nordmann et al., (2007) têm acusado valores de (PR) na faixa de 0,73 a 0,76, com valor médio anual de 0,74, Valores de (PR) na faixa de 0,68 a 0,75 e médio de 0,71, em 12 meses de monitoramento de um SFCR de pequeno porte, são também apresentados por Macedo e Zilles, (2007).

Esses resultados, expressos como médios anuais, para um ano de medições, podem subsidiar estudos de simulação de SFCR, proporcionando resultados mais reais às condições de operação. Muito embora, para um maior grau de confiança, os dados de radiação devem ser representativos, ou seja, dados médios relativos a séries históricas de estações climatológicas (período de observações de aproximadamente 10 anos) ou de experimentos em longo prazo (igual ou acima de três anos de monitoramento). Nesse sentido, a determinação da densidade de potencia específica para a Cidade do Recife é realizada utilizando-se dados existentes de series Históricas da Radiação Global para Recife.

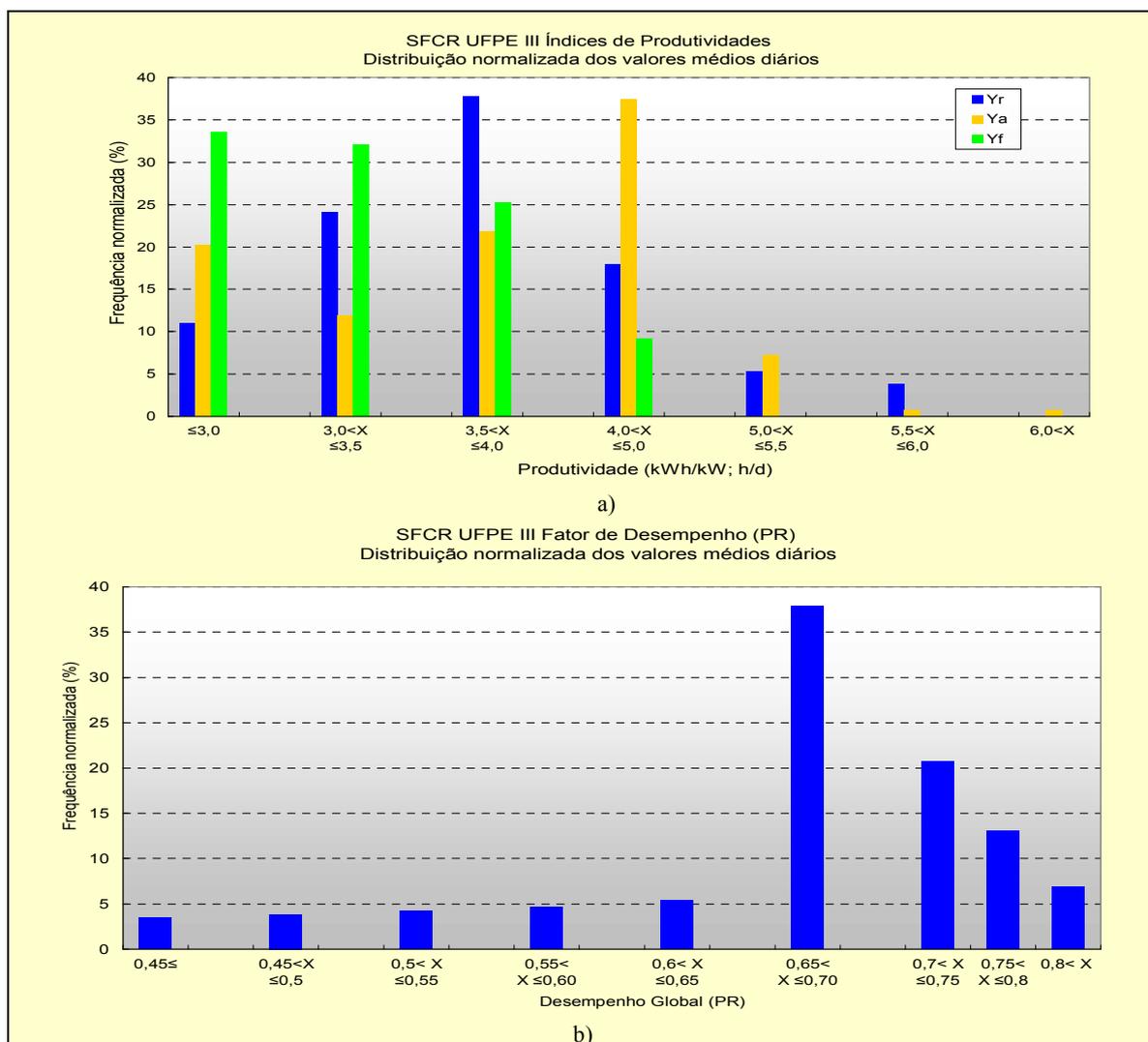


Figura 2: SFCR UFPE III. Frequência normalizada dos valores médios diários: a) Produtividades de referência, do arranjo e final do sistema; b) Fator de Desempenho (PR).

DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DE POTENCIA

A Tabela 1 apresenta três séries históricas de dados de radiação global no plano horizontal (H_h) para a Cidade do Recife. Esses dados são provenientes das seguintes bases de dados: Atlas Solarimétrico do Brasil, (Tiba et al., 2000), do Instituto Nacional de Metrologia- INMET, (www.inmet.gov.br) e NASA, (NASA gobal.satellite/analysis data)¹.

Considerando esses níveis de ($H_{h, base}$), os valores da radiação incidente em um plano inclinado, ($H_{fv, base}$) de 23° e faceando o Norte, foram calculados via procedimentos clássicos normalmente, modelos isotrópicos, (Kreith et al., 1978; Lorenzo, 1994; Tiba et al., 2000). Os resultados são mostrados na Figura 3a.

Para padronização das informações, foi definido um Sistema Padrão configurado como um arranjo de 10 m^2 de módulos fotovoltaicos, com características semelhantes as do Sistema-teste: módulos FV de (p-Si), localização ($\lambda=8,03^\circ\text{S}$), posicionamento ($\beta=23^\circ$) faceando o Norte e um Fator de Desempenho Global de 0,7. A produção de energia elétrica para esse Sistema-Padrão foi estimada por simulação utilizando-se a base de dados “Atlas do Brasil” e os índices operacionais de produtividade e desempenho global obtidos do Sistema-Teste.

Os resultados obtidos, representados pelo balanço energético na Figura 3b, mostram uma produção média diária de 4,72 kWh/d, ou seja, cerca de 130 kWh/mês ou 1,56 MWh/ano. Nessas condições, a Energia Específica, (EE)² resulta em 156 kWh/m^2 . Esse valor de Energia Específica ($156 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$) é representativo para qualquer sistema FV instalado em áreas que apresente um Nível de Luz de Céu igual a um, ($NLC=1$)³, (Barbosa, 2009). Ou seja, para um SFCR bem instalado e posicionado de acordo com as recomendações de não sombreamento e de máxima captação anual da radiação solar local.

¹ Disponível em: Clean Energy Project Analysis (www.retscreen.net)

² A Energia Específica é referida em termos anuais.

³ Nível de Luz de Céu: índice indicativo da quantidade e qualidade da iluminação na localidade foco.

Exemplificando, uma área de módulos FV (p-Si) de cerca de 100 m² (telhado 10x10m) para produzir cerca de 1.300 kWh/mês. Energia compatível com o consumo de três a quatro residências de tamanho médio (típico familiar médio).

Mês	H _h [Atlas]	H _h [INMET]	H _h [NASA]
Janeiro	6,437	5,827	6,74
Fevereiro	5,566	5,720	6,50
Março	5,352	5,072	6,23
Abril	3,528	5,485	5,40
Mai	4,510	4,494	4,98
Junho	3,702	4,535	4,49
Julho	3,819	4,603	4,62
Agosto	5,168	5,215	5,39
Setembro	5,976	5,822	6,09
Outubro	5,695	6,329	6,64
Novembro	6,169	6,168	6,82
Dezembro	6,343	5,951	6,78
Média anual	5,189	5,435	5,890

Bases de Dados: Atlas Solarimétrico do Brasil, (TIBA et al., 2000);
 Instituto Nacional de Metrologia- INMET, (www.inmet.gov.br);
 Dados de Satélites NASA, (NASA global.satellite/analysis data).

Tabela 1: Cidade do Recife. Radiação no plano horizontal ($\lambda=-8,03$) Médias diárias mensais (kWh/m².d)

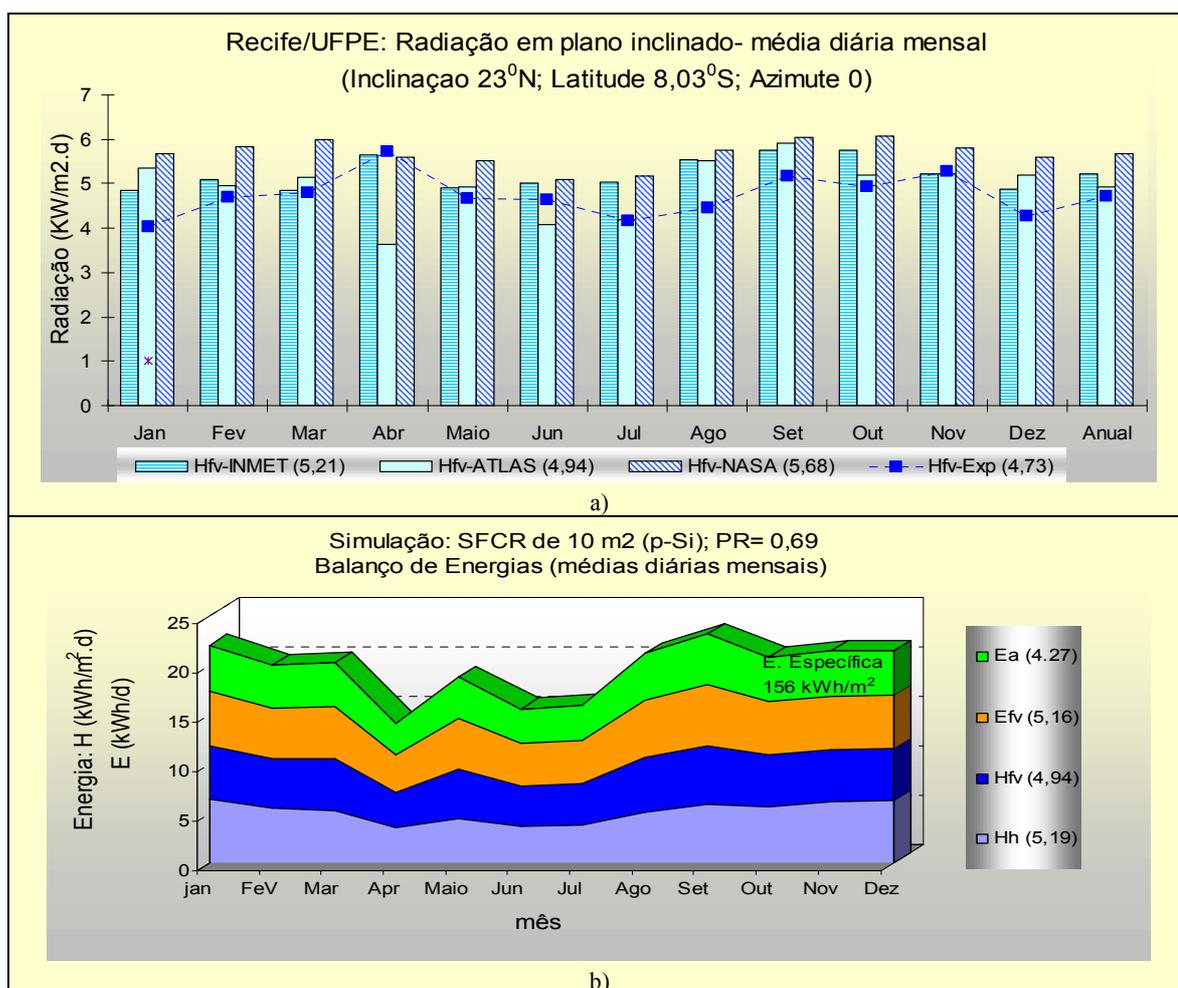


Figura 3: Cidade do Recife: a) Radiação incidente em um plano inclinado de 23°, faceando o Norte: Base de Dados: Atlas do Brasil, INMET e NASA; b) Balanço de energias e energia específica para o SFCR- Padrão (10m² de Si-poli).

CONCLUSÕES E DISCUSSÃO

A metodologia aplicada é adequada e mais representativa quando a análise é realizada baseada em períodos maiores (anuais). No entanto, a região do Nordeste do Brasil não apresenta grandes alterações nos níveis de irradiação e temperatura ambiente durante o ano, o que favorece a aplicação da metodologia.

- O Sistema-Teste tem funcionado muito bem não apresentando sérios problemas técnicos;
- Em 42% dos dias analisados o sistema de 1,28 kWp atendeu em 100% o consumo de energia elétrica da carga;
- Um SFCR de 10 m² de Silício poli-cristalino, quando bem orientado, produz cerca de 130 kWh/mês, energia que podem ser consumida diretamente pela carga ou ser injetada na rede convencional;
- O valor obtido para o Fator de desempenho (PR) de 70% é compatível com valores encontrados na literatura especializada para SFCR com PR muito satisfatório.
- Projetos de SFCR podem ser rapidamente dimensionados utilizando-se o valor de 156 kWh/m², representativo da Energia Específica para a região urbana da Cidade do Recife.

REFERÊNCIAS

- Barbosa, E. M. de S. (2009). Metodologia de avaliação do potencial de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em telhados Aplicação ao CAMPUS DA UFPE. Tese de Doutorado. Orientador Dr. Roberto Fernando de Andrade Lima. Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares PROTEN, No. 58. Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE.
- Barbosa, E. M. de S., Silva, D. O., Melo, R. de O. (2007). Sistema fotovoltaico conectado à rede com baterias - Sistema UFPE-BRASIL. Avances em Energias Renovables y Medio Ambiente, vol.II. ISSN 0329-5184, Novembro, 2007. XXX Reunião da Asociación Argentina de Energias Renovables y Ambiente, São Luiz, Argentina.
- 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, no PV95, Florença Itália, Agosto.
- Dávila, L., Castro, M., Amador, J., Puerta, D., Colmenar, A. (2004). Sistema de medidas para el modelado y monitorizado de generadores fotovoltaicos conectados a red. XII Congresso Ibérico e VII Iberoamericano de Energia Solar – CIES. Vol II, pp 10491054. Vigo, Espanha, Setembro, 2004.
- DIFUSIÓN IDAE. (2002). Pliego de condiciones técnicas de instalaciones conectadas a red. Depósito Legal: M-47488-2002, Madrid, Octubre.
- FSEC-GP-70-01. (2002). Grid-connected photovoltaic system design review and approval- operation and procedures. Procedure #7003, version 4.
- Jahn, U., Nasse, W., Clavdetscher, L., Mayer, D. (2004). Achievements of TASK 2 of IEA PPSP: final results on PV system performance. 19th European Photovoltaic Solar Energy and Exhibition, Paris, França.
- Jahn, U., Mayer, D., Heidenreich, M., Dahl, R., Castello, S., Clavdetscher, L., Frolich, A., Grimming, B., Nasse, W., Sakuta, K., Sugiura, T., Borg, Van Der N., Otterdijk, Van K. (2002). International Energy Agency PVPS TASK 2: Analysis of the operation performance of the IEA data base PV systems. 16th European Photovoltaic Solar Energy and Exhibition, Glasgow, United Kingdom, Maio,
- Macêdo, W.N. (2006). Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Tese de Doutorado. Orientador Dr.Zilles, R. Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, 2006.
- Mondol, J. D., Yohanis, Y., Smyty, Norton, B. (2006). Long term performance analysis of grid connected photovoltaic system in Northern Ireland. Energy Conversion & Management, 47, 2925-2947.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos técnicos do Grupo FAE/UFPE: Rinaldo de O. Melo, Marcelo Rodrigues, Eric Lopes e José Aguiar. O projeto contou com financiamento da FINEP- Ministério de Ciências e Tecnologia – BR (CT-INFRA 2004).

ABSTRACT

The methodological proposal is based on the experience acquired in the development of research projects (R&D) focused on technical aspects involved in the global performance of PV systems. It shows the monitoring schedule and the evaluation of the experimental data obtained during one year of system monitoring. The data acquisition system monitored the meteorological and electric parameters, from the captation of available solar radiation by the generator up to the production of useful electric energy and total electrical energy consumption for the demand. The results obtained are expressed in daily, monthly and annual average: solar energy generated and produced, electrical consumption and the solar energy injected into network and they result in promising annual operation indices, as the performance Ratio (PR) of 0.7. The specific energy, 156 kWh/m², was determined with thesis experimental dates. This value can subsidize simulation studies and new system projects giving results under real operational conditions. For example, about 15,6 MWh/year can be produced for 100m² of photovoltaic area, Electrical energy production equivalent to current electrical consumption of 4 familiar houses in Brazil.

Keywords: Grid connected photovoltaic system; Specific energy; Potential of photovoltaic roofs; Performance of grid-connected system.