

CONTRIBUIÇÃO ENERGÉTICA E ANÁLISE DE PERDAS DE CONVERSÃO C.C.-C.A. EM UMA APLICAÇÃO FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA NA UFPA

Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br

Renato Luz Cavalcante – renatolc@ufpa.br

Wilson Braga Júnior – wbj99@yahoo.com.br

Marcos Galhardo – galhardo@ufpa.br

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia

Resumo. O objetivo principal deste artigo é descrever e analisar o desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede instalado na Região Amazônica Brasileira. O sistema está funcionando desde dezembro de 2011, e está integrado ao novo laboratório GEDAE de energias renováveis e eficiência energética, localizado na cidade de Belém, Estado do Pará, Brasil. Ele é composto por um inversor 2,8 kW e um gerador fotovoltaico de 3,36 kWp. Este artigo apresenta os resultados pontuais de produção de eletricidade e de desempenho obtidos com o funcionamento do presente sistema. Estes resultados operacionais contribuem para a compreensão do funcionamento de sistemas fotovoltaicos em regiões quentes e úmidas como a Amazônia. Dados de geração com cerca de 14 kWh em dias de sol foram verificadas e picos de perdas de conversão c.c.-c.a. de aproximadamente 140 W também foram constatados.

Palavras-chave: Energia Solar, Conexão à Rede de Sistemas Fotovoltaicos, Perdas de Conversão.

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2011 ano base 2010, as centrais hidroelétricas representam 71,2 % da capacidade instalada de geração de potência elétrica no Brasil, que corresponde a aproximadamente 80,69 GW. No entanto, a busca por uma geração de energia elétrica descentralizada e próxima ao consumo é uma realidade que cresce a cada dia. Assim, o uso de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCRs) em aplicações residenciais e industriais é uma alternativa para a diversificação da produção de eletricidade no país. Porém, esta tecnologia ainda é pouco utilizada no Brasil e segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem menos do que 2 MW de potência instalada. Nesse contexto o Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), laboratório sede do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA) vêm desenvolvendo projetos para avaliar a viabilidade técnica e econômica desse tipo de aplicação.

Este artigo é resultado de pesquisa relacionada à implantação e avaliação de desempenho operacional de um SFCR de 2,8 kWp instalado na cidade de Belém do Pará, e os principais temas abordados serão a contribuição energética diária para várias situações de sol e condições operacionais e as perdas de conversão c.c.-c.a

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O SFCR implantado é constituído por um inversor de 2,8 kW da Xantrex modelo GT2.8-NA-240/208 UL-05 e um gerador FV com potência instalada de 3,36 kWp. Este último é composto de 15 módulos do modelo KC 120 da Kyocera e 13 do modelo AP120 da Astropower, cada um com potência nominal de 120 Wp. A Fig. 1 mostra o gerador FV instalado no telhado da ala norte do laboratório e a Fig. 2 ilustra o diagrama unifilar das conexões deste sistema.



Figura 1- Vista do gerador FV de 3,36 kWp, instalado no telhado da edificação.

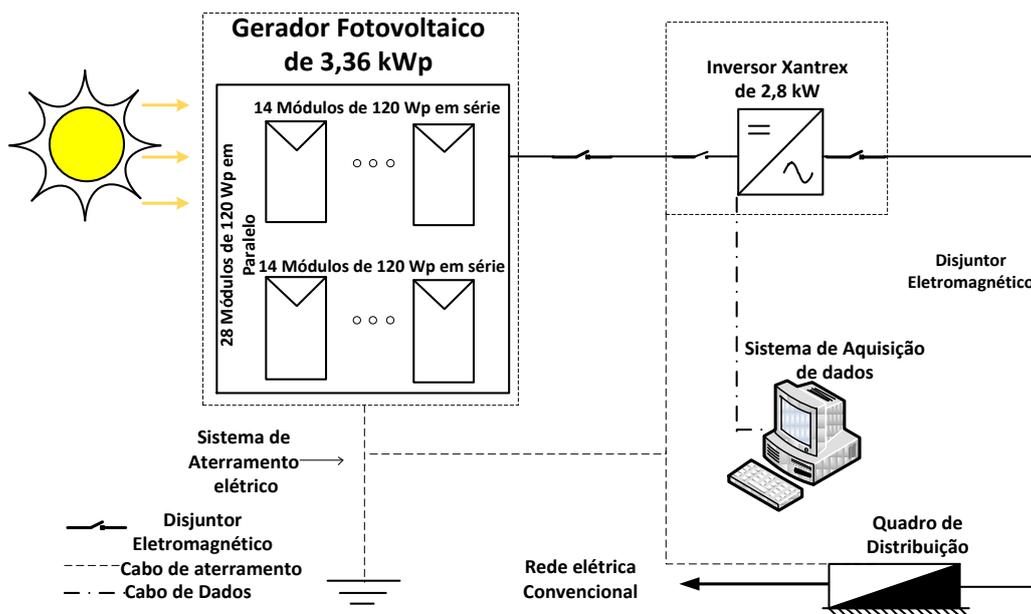


Figura 2- Diagrama unifilar de conexões do SFCR de 3,36 kWp.

Para interligar o gerador fotovoltaico de 3,36 kWp à rede elétrica foi utilizado um inversor Xantrex de 2,8 kW, modelo GT2.8-NA-240/208 UL-05, ilustrado na Fig. 3.



Figura 3- Inversor Xantrex instalado num compartimento interno da edificação.

Para as conexões entre o inversor e o gerador FV utilizaram-se dois plugs industriais, um para cada arranjo, e um quadro onde ficaram localizados os disjuntores e conectores para os polos positivos e negativos de cada arranjo. A Fig. 4 ilustra o diagrama de conexões e a instalação dos plugs e o quadro de conexão c.c.

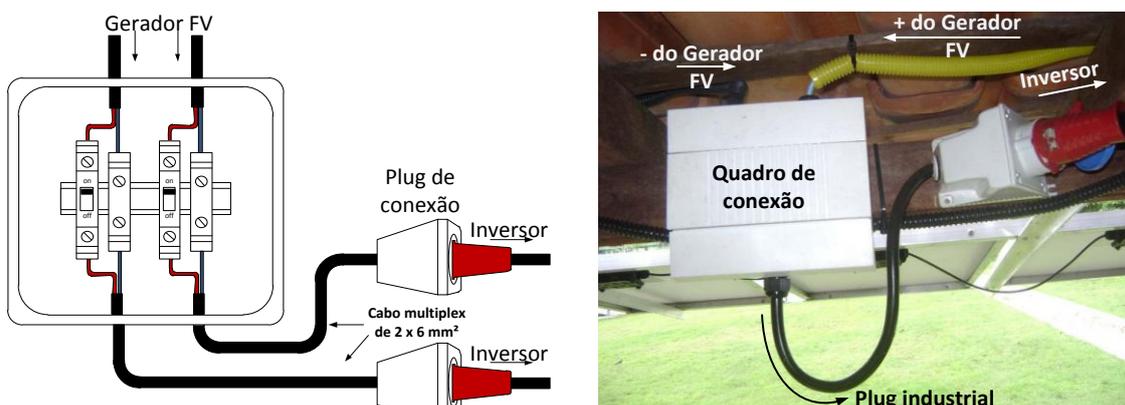


Figura 4 - Diagrama de conexão entre os arranjos e o inversor e conexão entre o gerador FV e o inversor Xantrex.

O processo de aquisição e visualização das grandezas elétricas tanto do barramento c.c. quanto do barramento c.a. do SFCR de 3,36 kWp é realizado por meio de um microcomputador dedicado. A Fig. 5 mostra o microcomputador que realiza esse monitoramento, com o detalhe indicando a comunicação com o inversor via cabo serial RS232, além da tela do programa de aquisição de dados.



Figura 5- Sistema de aquisição dedicado ao SFCR.

Amostras dos parâmetros elétricos são obtidas diretamente do inversor Xantrex, por meio do cabo serial RS232 e do software GT View 1.7, adquirido junto com o inversor, são armazenados em arquivo Microsoft Excel. As amostras e registro dos parâmetros monitorados podem ser coletados a cada 2 segundos.

3. RESULTADOS

Neste tópico apresenta-se os resultados experimentais do sistema descrito anteriormente. As informações dos parâmetros elétricos tanto do lado c.c. quanto do c.a. são obtidos através do software GT View 1.7, utilizado para a aquisição das informações referentes ao inversor. Outras informações extraídas de outros sistemas de aquisição existentes no laboratório também serão apresentadas.

3.1. Caracterizações do consumo de eletricidade da edificação

Antes de entrar na análise da operação dos SFCRs, será apresentada uma breve análise do consumo de energia elétrica da edificação. Esta análise foi realizada com base em dois meses de monitoramento do consumo de eletricidade da edificação, mais especificamente os meses de Julho e Agosto do ano de 2011, exemplificando a demanda energética de eletricidade. Vale ressaltar que os dados foram obtidos através da medição do quadro de força do GEDAE e que os mesmos estão subdivididos em ‘climatização’, ‘equipamentos’ e ‘iluminação’. A Fig. 6 mostra os gráficos da energia consumida nos dois períodos citados.

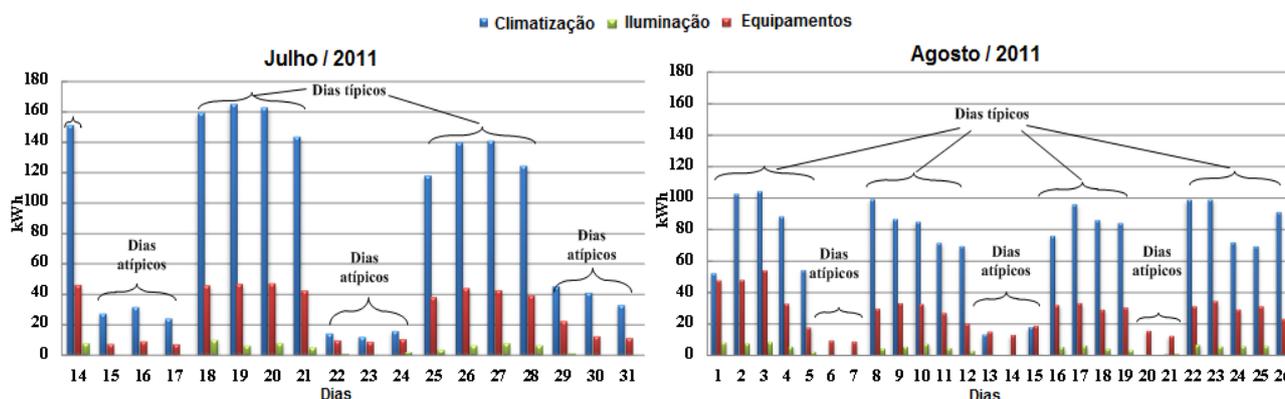


Figura 6- Consumo de energia elétrica da edificação nos meses de julho e agosto de 2011.

Observe que a ausência de dados referentes a alguns dias nos meses mostrados é decorrente de problemas ocorridos no microcomputador dedicado a esta finalidade. Com base nos dados representados na Fig. 6 é possível ter uma noção do consumo médio diário de energia elétrica da edificação. A Tab. 1 mostra um resumo do consumo médio diário de eletricidade por uso final e por período.

Tabela 1. Consumo médio diário de energia elétrica da edificação, por uso final.

Consumo Médio (kWh)	Climatização	Equipamento	Iluminação	Total
Dias úteis	103,36	36,15	5,94	145,46
Dias atípicos	17,33	12,07	0,39	29,79
Dias úteis + atípicos	72,08	27,40	3,92	103,40

A Fig. 7 mostra a curva de carga média da edificação para um dia útil, onde é possível observar as variações da demanda ao longo do dia para os três usos finais analisados e a curva de irradiância, para um dia ensolarado. A irradiância foi medida por um piranômetro fotovoltaico instalado no laboratório com uma orientação semelhante ao do gerador FV de 3,36 kWp.

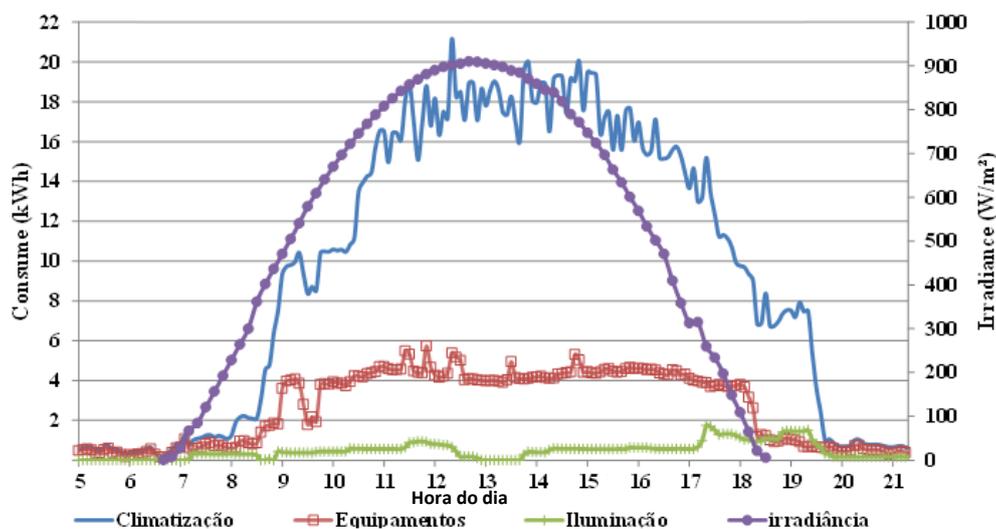


Figura 7 - Curva de carga elétrica da edificação para um dia útil.

É importante atentar para o perfil de consumo da edificação em que se observa um aspecto bastante interessante em termos de complementaridade, uma vez que o pico da demanda geralmente coincide com o pico da radiação solar e conseqüentemente com o pico da geração FV.

3.2. Contribuição energética do SFCR

A visualização da geração do SFCR, durante todo mês de dezembro, pode ser observada no gráfico mostrado na Fig. 8 referentes à produção diária de eletricidade do sistema (Macêdo *et al.*, 2012). O objetivo deste tópico é avaliar, de forma detalhada, qual a contribuição energética diária ao consumo por parte do SFCR perante diferentes situações de operação. Para isso, foi escolhido o mês de dezembro que além de possuir todos os dias de dados, foi um mês em que alguns problemas operacionais ocorreram, penalizando a operação do sistema e conseqüentemente seu desempenho.

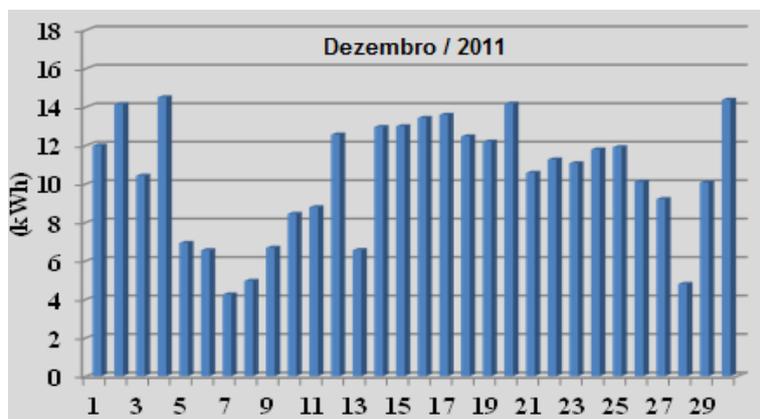


Figura 8- Gráfico de geração do SFCR de 3,36 kWp.

Com base nos dados obtidos com a monitoração do SFCR e no consumo da edificação, constatou-se uma geração média diária de aproximadamente 10,63 kWh, o que corresponde a 10,28% do consumo médio diário total de energia elétrica da edificação (103,4 kWh), tal como mostra a Tab. 2.

Tabela 2. Contribuição energética do SFCR ao consumo da edificação e análise de desempenho diário do SFCR.

Dia	Dezembro				
	PS [kWh]	CDC [%]	YF [kWh/kWp]	PR [%]	IS [kWh/m ²]
1	12,03	11,63	3,58	78,37	4,55
2	14,14	13,68	4,21	76,79	5,48
3	10,42	10,08	3,10	60,22	5,15
4	14,50	14,02	4,32	73,17	5,90
5	6,92	6,69	4,25	75,68	5,61
6	6,54	6,32	4,01	72,82	5,51
7	5,68	5,49	3,48	74,62	4,67
8	4,97	4,81	3,05	63,52	4,80
9	6,68	6,46	1,99	69,77	5,67
10	8,47	8,19	2,52	64,6	5,92
11	8,82	8,53	2,63	56,13	4,66
12	12,56	12,15	3,74	73,49	5,09
13	6,55	6,33	1,95	72,18	2,70
14	12,96	12,53	3,86	74,22	5,20
15	12,99	12,56	3,87	74,19	5,21
16	13,43	12,99	4,00	73,02	5,47
17	13,59	13,14	4,04	73,34	5,51
18	12,47	12,06	3,71	73,36	5,06
19	12,20	11,80	3,63	74,03	4,90
20	14,17	13,70	4,22	74,5	5,66
21	10,57	10,22	3,15	72,44	4,34
22	10,43	10,09	3,10	82,93	4,04
23	11,10	10,74	3,30	70,46	4,46
24	11,79	11,40	3,51	75,02	4,68
25	11,91	11,52	3,54	74,35	4,77
26	10,23	9,89	3,04	74,33	4,05
27	9,21	8,91	2,74	75,61	3,62
28	7,03	6,80	2,09	59,78	3,50
29	10,07	9,74	3,00	73,87	4,06
30	14,37	13,90	4,28	74,05	5,77
31	12,64	12,22	3,76	74,27	5,06
Mês	329,44	-	98,05	64,90	151,07
Média diária	10,63	10,28	3,41	72,10	4,87

Notas: - PS é a produção solar; - CDC é a contribuição diária ao consumo; - IS é a irradiação solar incidente; - PR é o rendimento global (*Performance Ratio*). - YF é a produtividade do sistema.

De acordo com os dados experimentais é possível constatar variações significativas no rendimento global (*Performance Ratio*), em função dos problemas operacionais ocorridos no gerador FV e no quadro de conexões c.a. Contudo, o valor médio obtido para o rendimento global no período de monitoração é de 72,10%, que é considerado um bom rendimento em virtude dos problemas apresentados.

Os valores em negrito na Tab. 2 representam dias em que houve algum tipo de problema no SFCR. A operação anormal nesses períodos justificam os baixos valores de contribuição energética do SFCR para a edificação, quando comparados com dias em que o sistema estava em operação normal. No dia 3 foi constatado um problema de ponto quente em um amperímetro localizado no quadro de conexão c.a. Durante o período do dia 5 ao dia 8 o sistema funcionou somente com a metade do gerador FV, pois foi necessário o desligamento de uma fileira de módulos em série para identificar e resolver um problema de curto circuito na caixa de conexão de um dos módulos. No dia 8, além da interrupção de metade do gerador FV, a geração do SFCR ainda foi prejudicada devido a interrupção na energia elétrica da concessionária, fazendo com que o sistema deixasse de produzir eletricidade a partir 13:50 h.

Após o dia 8 a capacidade total do gerador FV foi restabelecida, porém nos dias 9,10 e 11 houve novas interrupções no fornecimento de energia elétrica por parte da rede convencional e por períodos de tempo consideráveis. Por fim, no dia 28 foi necessário fazer uma manutenção na estrutura do telhado, sendo necessário que o sistema

operasse novamente com a metade dos módulos FV. Ressalta-se que foi considerado apenas 1,68 kWp para o cálculo de YF e PR nos dias em que somente metade do gerador FV estava funcionando. Já para o cálculo do valor mensal foi considerado a capacidade total do gerador FV para todo o período, penalizando o desempenho do sistema.

Outro fator determinante na variação da contribuição energética está associado às variações irregulares. Para explicitar melhor as influências meteorológicas, na Tab. 2 constam também os valores de irradiação solar incidente no plano do gerador fotovoltaico.

Na Fig. 9, onde são mostrados dados de potência elétrica c.a. gerada e irradiação no plano do gerador FV para diferentes dias de operação.

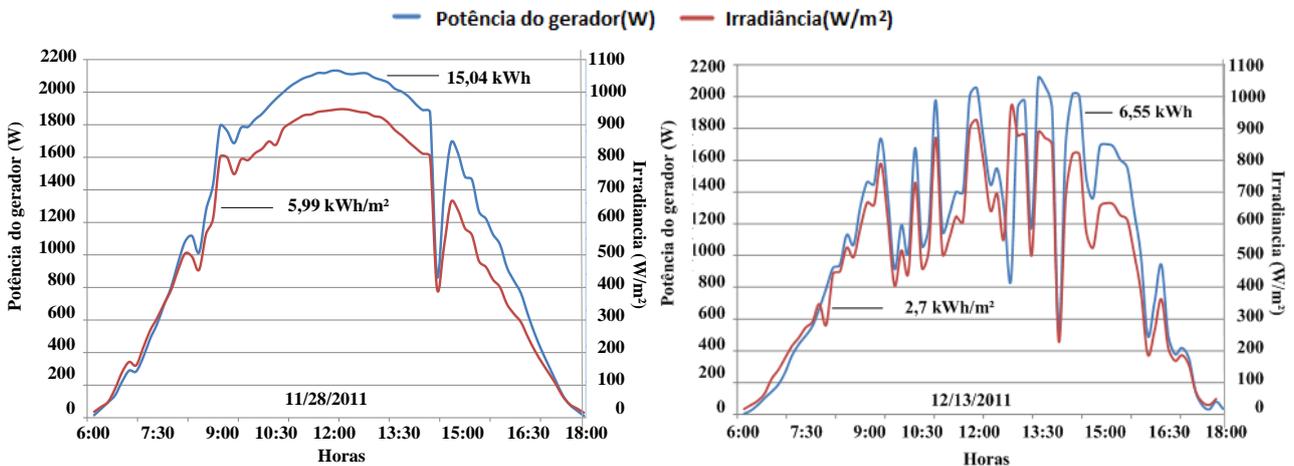


Figura 9 - Gráficos de potência elétrica c.a. gerada e irradiação no plano do gerador FV para um dia ensolarado e um nublado.

Por meio dos valores instantâneos de potência elétrica e irradiação da Fig. 9 é possível verificar diferenças significativas de produção.

3.2. Análise de perdas no inversor

As perdas de potência no inversor podem ser interpretadas pela soma de três componentes, que são: as perdas de autoconsumo, P_{auto} [W]; as perdas lineares com a corrente (quedas de tensão nos semicondutores), $K_1 \cdot P_{\text{Saída}}$ [W], e as perdas proporcionais ao quadrado da corrente (perdas ôhmicas), $K_2 \cdot P_{\text{Saída}}^2$ [W]. Dessa forma, o polinômio de perdas, em Watts, pode ser modelado por:

$$P_{\text{Perdas}} = P_{\text{auto}} + K_1 \cdot P_{\text{saída}} + K_2 \cdot P_{\text{Saída}}^2 \quad (1)$$

A Fig. 10 mostra, para o inversor Xantrex analisado, a variação das perdas em função da potência de saída, em Watts, bem como a curva de eficiência de conversão do inversor em função da potência de saída normalizada com relação à potência nominal do inversor.

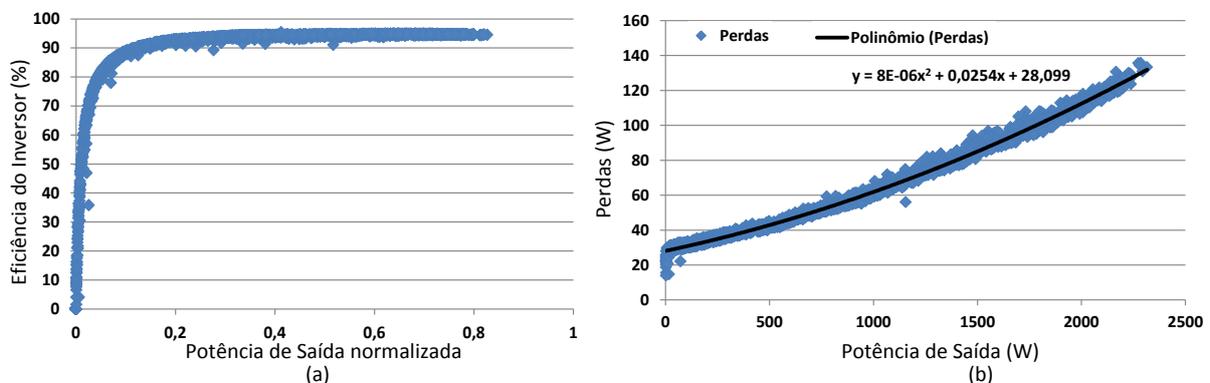


Figura 10- Dados experimentais de eficiência de conversão c.c.-c.a. e perdas no inversor GT2.8-NA-240/208 UL-05.

Na Fig. 10 (b) é possível observar a linha de tendência associada às perdas no processo de conversão c.c.-c.a. do inversor Xantrex analisado, bem como a equação empírica representativa da mesma. De maneira análoga à Fig. 10, na Fig. 11 são mostrados os resultados operacionais obtidos para dois outros sistemas, instalados no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (Macêdo, 2006). Comparando a Fig. 10 com a Fig. 11 é possível

observar a semelhança entre as curvas de tendência dos dados representativos das perdas de conversão c.c.-c.a. nos dois experimentos.

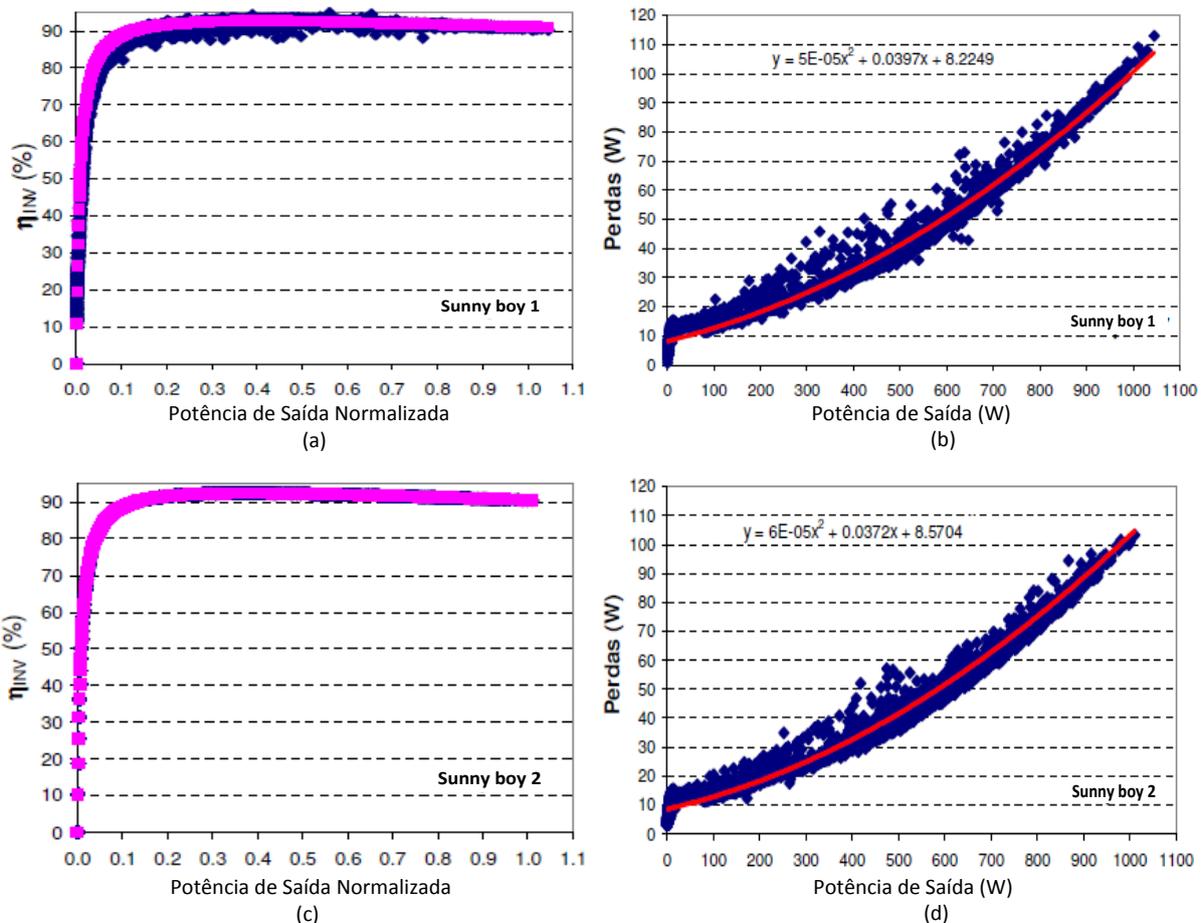


Figura 11 - Dados experimentais de eficiência de conversão c.c.-c.a. e perdas em dois inversores de 1 kW instalados em outra localidade do Brasil.

Comparando-se as equações empíricas das Fig. 10 e 11 com a equação característica do polinômio de perdas, Eq. (1), é possível determinar os coeficientes de perdas que compõem a Tab. 3. Nela são descritos, dentre outros, os parâmetros de autoconsumo para os inversores GT2.8, Sunny Boy 1 e Sunny Boy 2.

Tabela 3 - Parâmetros característicos, autoconsumo, potência nominal.

Grupo	K_1	$K_2[1/W]$	$P_{\text{auto}}[W]$	$P_{\text{inv}}^0 [W]$	$P_{\text{auto}}[W]/P_{\text{inv}}^0 [W]$
Xantrex	0,0254	$8 \cdot 10^{-6}$	28,0990	2800	0,010035
Sunny Boy 1	0,0397	$5 \cdot 10^{-5}$	8,2249	1000	0,008225
Sunny Boy 2	0,0372	$6 \cdot 10^{-5}$	8,5704	1000	0,008570

Nota: P_{inv}^0 é a potencia nominal do inversor; P_{auto} é a potência de autoconsumo.

Vale ressaltar que os SFCRs utilizados para comparação na Tab. 3 foram instalados em 2003, localizados em outro Estado do Brasil e em condições climáticas diferentes. Observa-se uma diferença significativa relacionada aos coeficientes de perdas ôhmicas (K_2). Já com relação aos coeficientes de queda de tensão (K_1) essas diferenças existem, porém são muito menos acentuados. Apesar do inversor analisado na Fig. 10 possuir uma potência nominal de 2,8 kW, os parâmetros característicos associados às perdas dependentes da potência de operação são menores se comparados aos parâmetros mostrados nas Fig. 11(b) e Fig. 11(d), que são proveniente de inversores com potência nominal de 1 kW. As diferenças entre estes parâmetros podem estar associadas aos fatores climáticos distintos e, principalmente, às diferentes tecnologias aplicadas aos inversores analisados.

A partir dos resultados experimentais foi possível observar também perdas de conversão da ordem de 140 W, quando operando o mais próximo possível da potência nominal (2,8 kW). Reduções nos valores dos coeficientes de perdas implicam em uma diminuição na variação entre as potências de entrada e saída do inversor, ou seja, há um aumento na eficiência. Nas Fig. 10(a) e 11(a) pode ser observado nos gráficos de eficiência de conversão para os inversores analisados. Vale ressaltar que os inversores utilizados para comparação são, além de modelos de potência nominal menores, mais antigos, cerca de 7 anos de diferença com relação ao inversor testado neste trabalho.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o processo de instalação e monitoração de um SFCR, tendo como foco principal a análise dos resultados a partir dos parâmetros elétricos medidos. Sua realização permitiu que fossem mensuradas as condições de operação e funcionalidade do SFCR instalado na cidade Belém-PA. Além disso, as informações de montagem e análise de dados podem ser adaptadas para outros SFCRs em diferentes cidades. Contudo, devido ao curto intervalo de monitoração do sistema durante o estudo, foram priorizadas as análises pontuais dos dados obtidos, as quais possibilitaram relacionar as variações de desempenho do sistema com suas causas. Os resultados em termos de produtividade, rendimento global e de produção de energia elétrica, para este tipo de aplicação, foram considerados satisfatórios tendo em vista o número de eventos ocorridos, penalizando a operação do SFCR.

Levando em consideração que o SFCR em estudo supre atualmente aproximadamente 10 % do consumo da edificação, seria necessário uma potência instalada de aproximadamente 33 kWp de potência FV para atender a energia elétrica média diária consumida no laboratório. Isso nos dá um indicativo claro de que o impacto de geração FV atual na redução do consumo de eletricidade da edificação é pequeno, porém de importância significativa já que se trata de uma tecnologia de energia renovável, com custos cada vez menores e bastante adaptados ao contexto local.

Com relação às perdas no processo de conversão c.c.-c.a., nota-se que apesar da semelhança entre as equações empíricas, é possível constatar que o inversor GT2.8-NA-240/208 UL-05 apresenta os menores coeficientes de perdas linear (K_1) e quadrática (K_2), enquanto que seu autoconsumo (P_{auto}) é cerca de 3,4 vezes o valor dos demais inversores comparados. Este último parâmetro, quando dividido pela potência nominal de cada inversor em particular, têm sua relação reduzida para 1,2 vezes o valor dos demais inversores comparados. Ou seja, a diferença entre os valores de potência de autoconsumo é inferior a 2 W por kW de potência nominal dos três inversores comparados.

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

- Balanço Energético Nacional 2011: Ano base 2010. Empresa de Pesquisa Energética. - Rio de Janeiro: EPE, 2011. Acesso em 08/01/2012. Disponível em: <http://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acessado em 03 de janeiro de 2012.
- BIG - Balanço de Informações de Geração. Agência Nacional de Energia Elétrica. 2011. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=12&fase=3>>. Acesso em 03 de janeiro de 2012.
- Macêdo, W. N., 2006. Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. 183 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Macêdo, W. N., Cavalcante, R. C., Galhardo, M., Pereira, E., Júnior, W. B., Pinho, J. T., 2012. Grid-Connected PV Application In The Amazon Region: A Case Of Study Of A 3,3 kWp System. World Renewable Energy Forum, Denver, Colorado.

ENERGY CONTRIBUTION AND ANALYSIS OF LOSSES OF CONVERSION DC-AC IN APPLICATION OF THE GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS IN OF UFPA

Abstract. *The purpose of this paper is to describe and analyze the performance of a grid-connected PV system located in the Brazilian Amazon Region. This system is in operation since December 2011 and is located at GEDAE's Laboratory of Renewable Energy and Energy Efficiency, in the city of Belém, State of Pará, Brazil. It consists in a 3.36 kWp PV generator connected in a 2.8 kW inverter. The paper also presents electricity production and efficiency results obtained with the operation of this system. These results contribute to minimize the lack of operational information about grid-connected PV systems in the region, since almost all grid-connected systems in Brazil are located in the southern, southeastern or northeastern regions. The operational results reported in this paper can contribute to the understanding of PV systems operation in hot and humid climates such as the Amazon Region.*

Key words: *Grid Connected Photovoltaic Systems, Energy Contribution, Losses of Conversion.*