

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO OPERACIONAL DO PRIMEIRO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA E INTEGRADO À EDIFICAÇÃO DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Gilberto Figueiredo Pinto Filho – gfilho@ufpa.br
Wilson Negrão Macêdo – wnmacedo@ufpa.br
Marcos André Barros Galhardo - galhardo@ufpa.br
Alex Renan Arrifano Manito - alexmanito@ufpa.br
João Tavares Pinho - jtpinho@ufpa.br

Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas – GEDAE, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará

Resumo. Este trabalho apresenta a análise operacional do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (SFCR) instalado no Laboratório de Energias Renováveis e Eficiência Energética do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) da Universidade Federal do Pará (UFPA). O sistema é composto de um gerador fotovoltaico de 1,575 kWp integrado ao telhado da edificação e um inversor para conexão à rede com potência nominal de 2,5 kW. Um sistema de aquisição de dados foi desenvolvido para facilitar na análise operacional do SFCR, assim como auxiliar na detecção de possíveis problemas. São apresentados os componentes do sistema de aquisição de dados e os dados operacionais provenientes da monitoração do SFCR.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico conectado à rede, Integração à edificação, Aquisição de dados.

1. INTRODUÇÃO

O Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE) é um laboratório da Universidade Federal do Pará (UFPA), localizado na cidade de Belém-PA, voltado para a pesquisa e desenvolvimento nas áreas de energias renováveis, eficiência energética, arquitetura bioclimática e conforto ambiental, qualidade e uso racional da energia elétrica, geração distribuída interligada à rede elétrica e práticas de conservação de energia e automação predial. Neste contexto, um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) foi instalado no laboratório, integrado à arquitetura do prédio, com o intuito de suprir parte do seu consumo energético ao longo do dia. A Fig. 1 mostra uma planta virtual da edificação com o gerador fotovoltaico (FV) em operação e o que será instalado após a expansão do sistema.



Figura 1 – Incorporação dos módulos fotovoltaicos na edificação

Os dados de energia gerada e consumida na edificação, assim como temperatura de costa de célula do gerador FV, irradiância incidente no plano do gerador e outros parâmetros elétricos, hidráulicos e ambientais referentes ao desempenho da edificação são monitorados por um sistema de supervisão, permitindo, assim, a realização de análises que servirão como base para diversas pesquisas. Neste trabalho será tratada apenas a parte da monitoração relacionada ao SFCR instalado na edificação.

Um dos objetivos da edificação proposta pelo GEDAE é a sua eficiência por meio da redução de seu consumo energético através de estratégias arquitetônicas, tais como: o aproveitamento da iluminação solar, da ventilação natural e a utilização de materiais de construção adequados, tais como tijolos e telhas de barro, que permitem uma fácil e rápida troca de calor com o meio externo favorecendo a retirada do calor interno armazenado durante o dia. Além disso, a edificação será dotada de equipamentos e sistemas eficientes, de forma que contribuam para a preservação do meio

ambiente e o uso racional da energia elétrica. Vale destacar que futuramente serão integradas à matriz energética da edificação outras formas de geração, como a eólica, formando um sistema híbrido interligado à rede elétrica convencional.

2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

O SFCR do GEDAE é composto por um inversor de 2,5 kW e um gerador FV de 1,575 kWp. Este último é constituído de 21 módulos do modelo SP 75 da Siemens, cada um com potência nominal de 75 Wp, todos conectados em série, orientados a 19° noroeste e inclinados de 14° com relação à horizontal. A Fig. 2 mostra o gerador FV instalado no telhado da primeira ala construída do laboratório e a Fig. 3 mostra o diagrama unifilar das conexões do sistema.



Figura 2 - Vista do 1º SFCR da região amazônica, integrado à edificação do GEDAE.

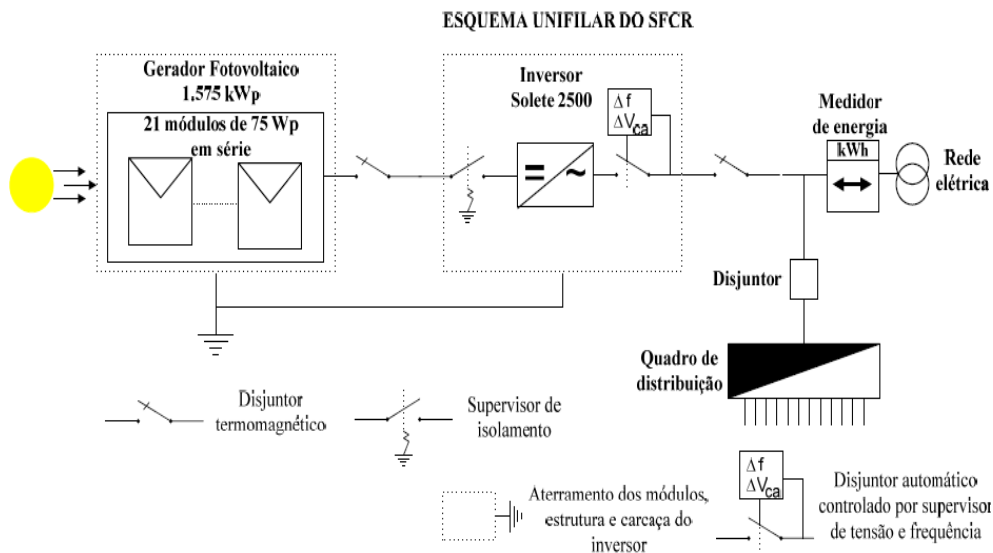


Figura 3 – Diagrama unifilar de conexões do SFCR.

O processo de instalação do SFCR do GEDAE se deu nos meses de setembro a novembro de 2007. Nesse processo estão inclusos o projeto elétrico das conexões do sistema e o projeto da estrutura metálica de sustentação do gerador FV, assim como a integração do conjunto gerador-estrutura no telhado da edificação. Maiores informações sobre as etapas de instalação do SFCR podem ser encontradas em Macêdo *et al.* (2008).

O inversor utilizado no SFCR do GEDAE é o *SOLETE 2500*, da fabricante espanhola *ENERTRON*. Esse equipamento possui potência nominal de 2,5 kW e trabalha com tensão alternada de 220 V. A aquisição e visualização de dados era feita, inicialmente, através de um medidor eletrônico e um gerenciador de energia. Mais detalhes a respeito das especificações técnicas do inversor e da aquisição dos dados provenientes dos medidores são mostrados em Macêdo *et al.* (2008).

3. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Em substituição a medição previamente implantada, foram desenvolvidos *software* e *hardware* que permitem a obtenção de outros parâmetros elétricos, como também a aquisição de dados climáticos (temperatura e irradiância), além de se ter uma interface personalizada do *software* desenvolvido. A aquisição dos parâmetros é feita em tempo real com o intuito de possibilitar estudos mais detalhados e avaliações mais criteriosas do SFCR. O sistema de aquisição de dados é capaz de medir tensão e corrente CC e CA, temperatura de costa de célula (T_j) e irradiância (H), além de estar preparado para a introdução de outros parâmetros, caso necessário, conforme o diagrama mostrado na Fig. 4.

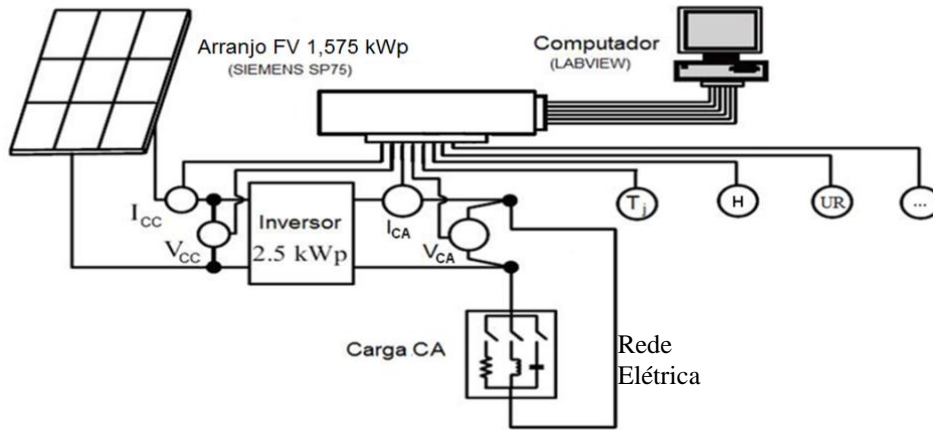


Figura 4 - Diagrama representativo do sistema de aquisição de dados desenvolvido.

O sistema de aquisição foi desenvolvido em três partes, sendo elas: confecção do *hardware*, desenvolvimento de um programa computacional para monitoração utilizando a plataforma LabVIEW¹ e instalação deste sistema na edificação.

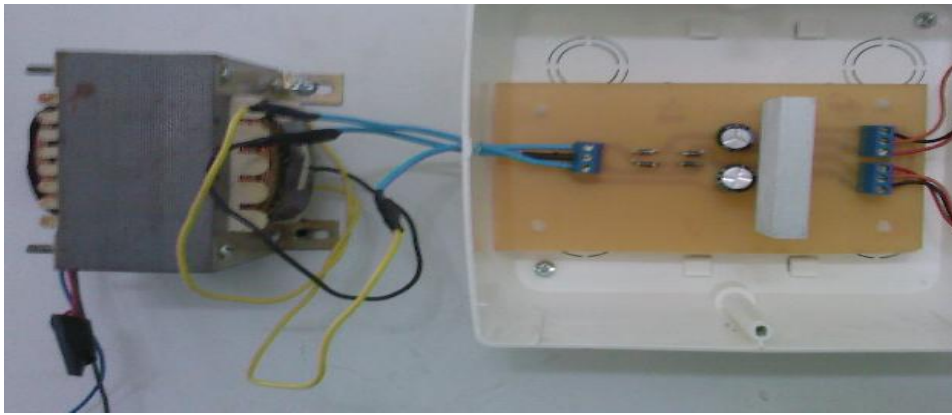
O *hardware* é composto por placas de circuito impresso desenvolvidas para receber os sinais a serem medidos, condicioná-los através de transdutores, e enviar os sinais para uma placa de aquisição de dados. Os transdutores utilizados para as medições de parâmetros elétricos (tensão e corrente tanto CA como CC) foram o LV 25-P e o HAL 50-S, do fabricante LEM. O primeiro tem a função de realizar medições de tensão CA, CC e pulsada em uma faixa de 10 a 500 V, e possui isolamento galvânica entre o circuito primário (alta tensão) e o secundário (circuito eletrônico), promovendo na sua saída um sinal analógico cuja forma de onda é linearmente proporcional à entrada. O segundo tem a função de realizar medições de corrente CA, CC e pulsada em até três vezes a corrente nominal no lado primário ($I_{\text{nominal}} = 50 \text{ A}$), e também possui isolamento galvânica entre o circuito primário (alta potência) e o circuito secundário (eletrônico). A saída do transdutor é um sinal de tensão analógico cuja forma de onda é linearmente proporcional à forma de onda da corrente de entrada no circuito primário.

A partir das características técnicas dos transdutores foram feitos os circuitos eletrônicos necessários para o correto funcionamento destes, distribuídos em três módulos separadamente. A finalidade da separação em circuitos modulares é, basicamente, facilitar a manutenção, quando necessário, de um único módulo sem causar interferência na integridade de outro.

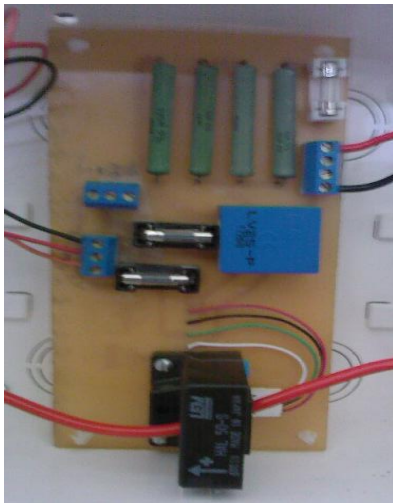
O primeiro módulo é uma fonte de tensão simétrica de +15 Vcc / -15 Vcc para alimentar os transdutores de tensão e de corrente. É um circuito composto por um transformador 220V/18V seguido por quatro diodos que formam um retificador em ponte. Em um último estágio, é feita a regulação de tensão por dois capacitores e dois reguladores de tensão, um de -15 V (modelo KIA7915P/PI) e outro de +15 V (modelo KA7815), obtendo, na saída, os valores de +15 Vcc, -15 Vcc e referência (0 V).

O segundo módulo corresponde à medição de tensão e corrente do barramento CC, por meio dos transdutores, instalado entre o gerador FV e a entrada do inversor. Finalmente, o terceiro é referente à medição de tensão e corrente do barramento CA, instalado na saída do inversor. Os três módulos podem ser vistos na figura 5.

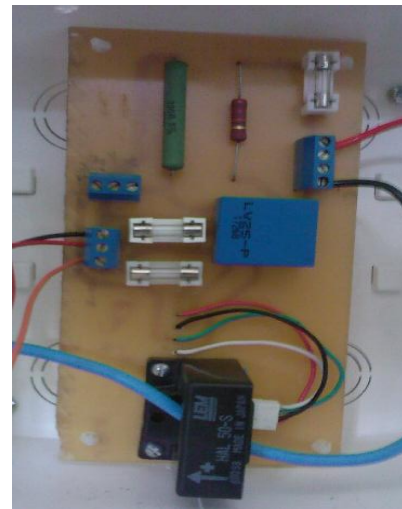
¹ LabVIEW (acrônimo de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma plataforma para programação através de diagrama de blocos de funções desenvolvida pela *National Instruments*, e que apresenta uma grande vantagem associada a facilidade de construção de programas com interface gráfica amigável.



(a) Fonte simétrica + 15 V / - 15 V (primeiro módulo).



(b) Medidor da parte CC (segundo módulo).



(c) Medidor da parte CA (terceiro módulo).

Figura 5 – Módulos que compõem o novo sistema de aquisição de dados do SFCR do GEDAE/UFPA.

A interface do sistema de aquisição de dados do SFCR é um módulo do programa computacional para a monitoração completa do desempenho energético da edificação, sendo este último desenvolvido com a finalidade de monitorar uma edificação, no sentido de avaliar os parâmetros climáticos e as estratégias de conforto ambiental; analisar os parâmetros elétricos da edificação, monitorando a qualidade e o consumo de energia elétrica; e avaliar a auto-suficiência da edificação referente a recursos elétricos e hídricos a partir do monitoramento de um sistema de geração conectado à rede elétrica e medindo os níveis e consumo nos reservatórios do sistema de distribuição de água. Maiores detalhes sobre o programa podem ser encontrados em Manito (2010).

A interface deste módulo consiste em um diagrama unifilar do sistema fotovoltaico conectado à rede, onde são colocados indicadores numéricos nos diversos pontos monitorados, conforme mostrado na Fig. 6. Esta interface também conta com um diagrama dinâmico onde elementos, como chaves, mudam de estado dependendo do comportamento do sistema.

As variáveis monitoradas neste caso são: tensão, corrente, potência e energia em vários pontos do sistema, além de valores de temperatura de costa das célula e de irradiância solar incidente sobre os módulos FV. Também é possível visualizar as formas de onda de tensão e corrente tanto no lado CC quanto no lado CA do sistema, como apresentado na Fig. 7.

Ressalta-se que apesar de o programa permitir o monitoramento de irradiância e temperatura, esses parâmetros até o momento não estão sendo monitorados porque o laboratório está angariando recursos para adquirir os equipamentos de condicionamento adequados para tal.

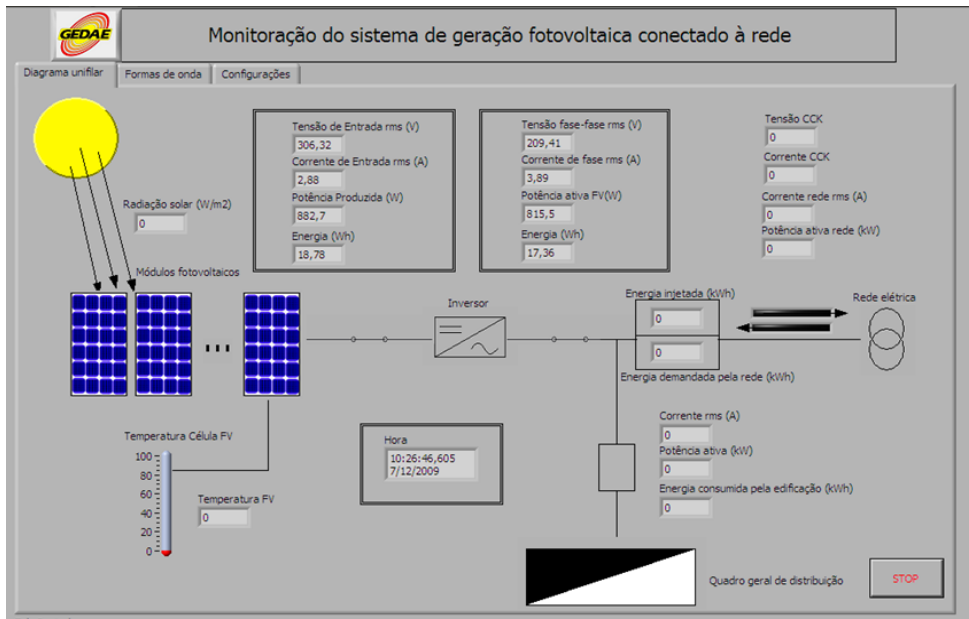


Figura 6 – Monitoração do SFCR.

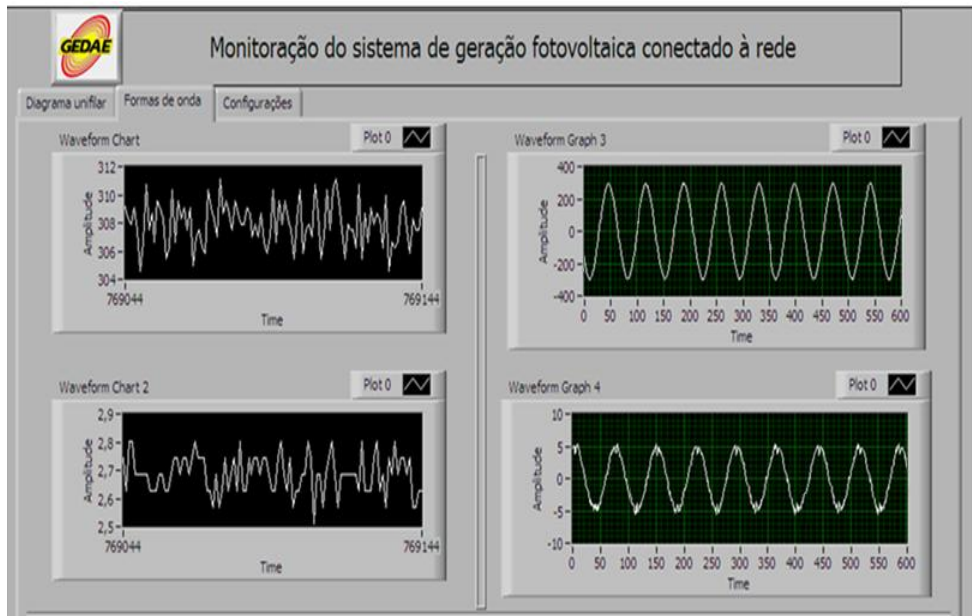


Figura 7 – Monitoração das formas de onda de tensão e corrente CC e CA do SFCR.

O monitoramento da edificação considera a supervisão e armazenamento de diversos parâmetros elétricos e climáticos. Todavia, este trabalho trata somente dos parâmetros que estão voltados ao SFCR, isto é, valores de tensão e corrente antes (CC) e depois (CA) do inversor.

A instalação dos três módulos, descritos anteriormente, permitiu o condicionamento do sinal para a aquisição dos parâmetros elétricos. Eles podem ser vistos na Fig. 8 (a). A Fig. 8 (b) mostra uma visão mais ampla do sistema.

Com base nas informações coletadas até então do SFCR, é possível quantificar as produções energéticas diárias e mensais, além de permitir uma análise mais específica em relação à qualidade da energia elétrica fornecida pelo sistema, o que facilita a identificação das contribuições e efeitos de sua operação em paralelo com a rede elétrica convencional de distribuição. Tomando os resultados experimentais como ponto de partida, será mostrada a influência da geração FV em parâmetros de qualidade da energia elétrica na edificação como: distorção harmônica total (THD – *Total Harmonic Distortion*), fator de potência (FP) e tensão RMS.



(a) Três módulos do sistema

(b) Visão geral do sistema

Figura 8 – Instalações provisórias do sistema de aquisição de dados.

4. DADOS OPERACIONAIS

A primeira questão a ser tratada neste tópico é a contribuição energética do SFCR para a edificação. As Fig. 9 a 13 mostram curvas obtidas através de medidas de produção de eletricidade diária nos meses de agosto a dezembro de 2009, mostram o quantitativo de kWh injetado pelo sistema na rede de distribuição.

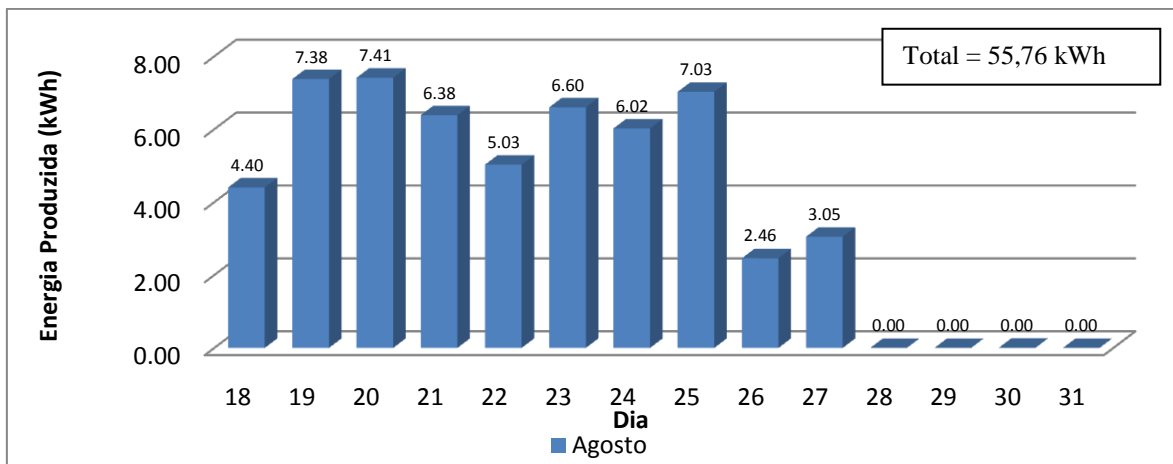


Figura 9 – Energia produzida (kWh) pelo SFCR no mês de agosto de 2009.

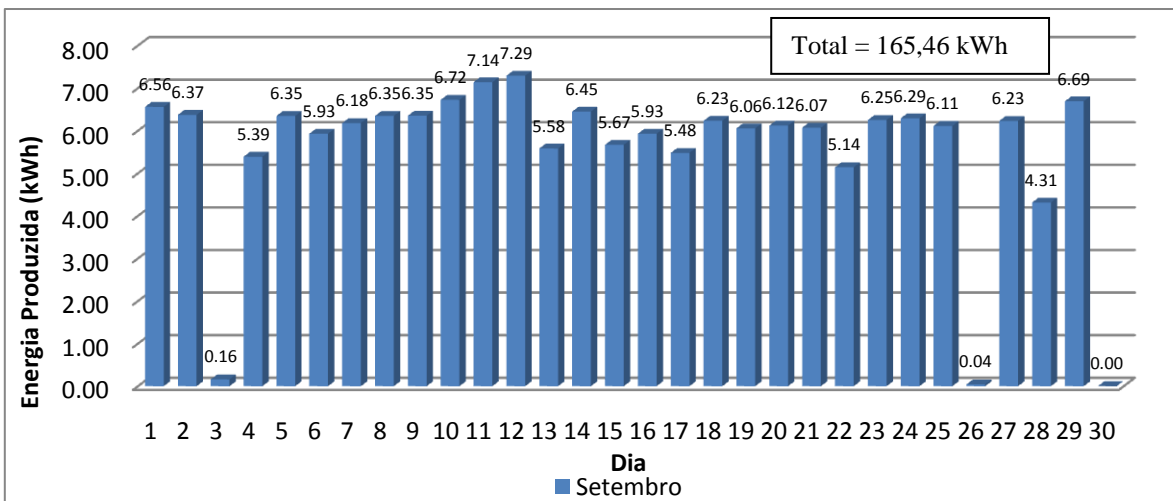


Figura 10 – Energia produzida (kWh) pelo SFCR no mês de setembro de 2009.

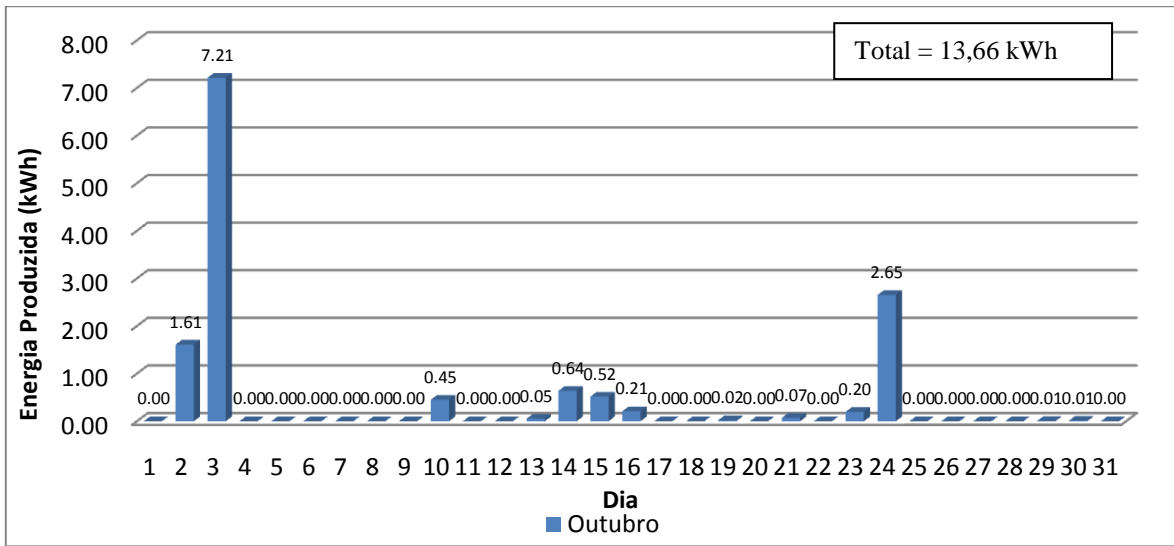


Figura 11 – Energia produzida (kWh) pelo SFCR no mês de outubro de 2009.

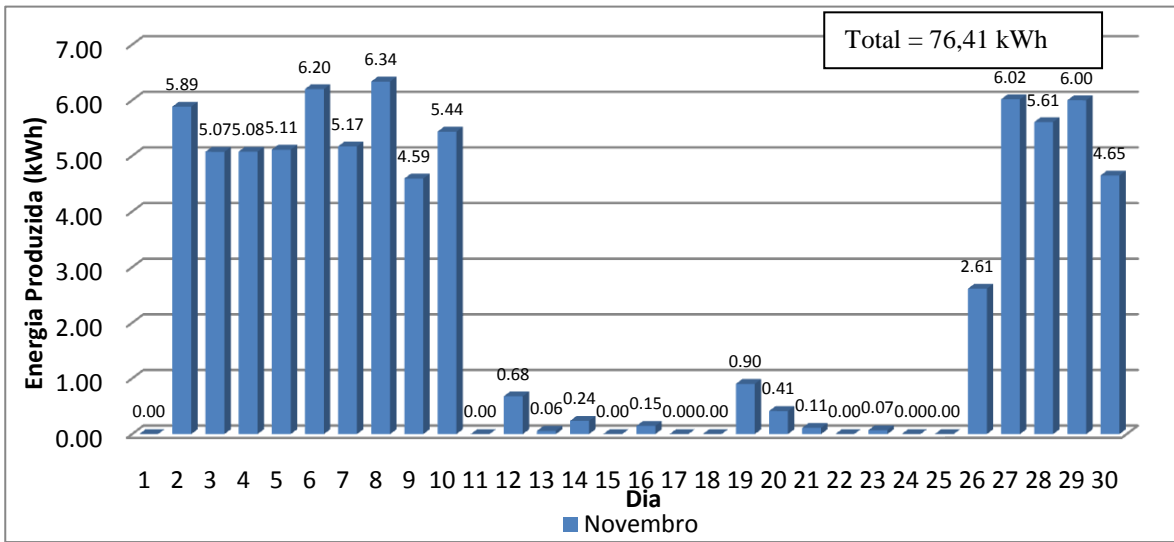


Figura 12 – Energia produzida (kWh) pelo SFCR no mês de novembro de 2009.

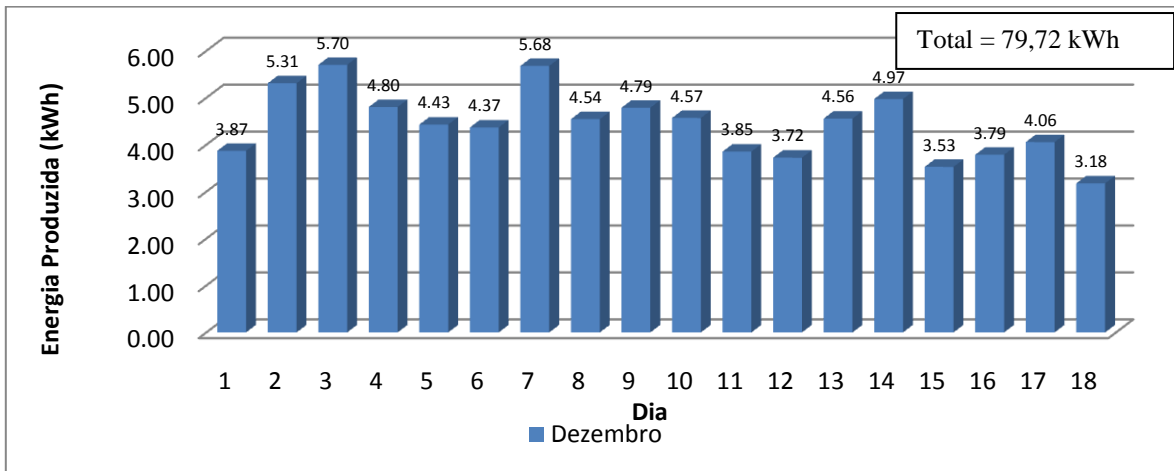


Figura 13 – Energia produzida (kWh) pelo SFCR no mês de dezembro de 2009.

É de extrema importância mencionar que os dias que apresentam valores de produção de energia iguais ou próximos de zero representam as desconexões do inversor. Um fator que pode estar influenciando no funcionamento

contínuo do SFCR é o valor RMS da tensão bifásica, já que foi possível verificar, em várias medições, como mostrado na Fig. 14, que valores baixos de tensão são atingidos durante intervalos de tempos irregulares. Embora inversores comerciais trabalhem em uma faixa de operação de 190 a 250 V no lado CA, constatou-se empiricamente que para níveis de tensão em média inferiores a 209,5 V o sistema geralmente desconectava, o que pode justificar alguns desligamentos. Além disso, muitos desses inversores são sensíveis as variações da impedância de entrada da rede, o que faz o ponto de conexão um elemento crítico na operação desses sistemas.

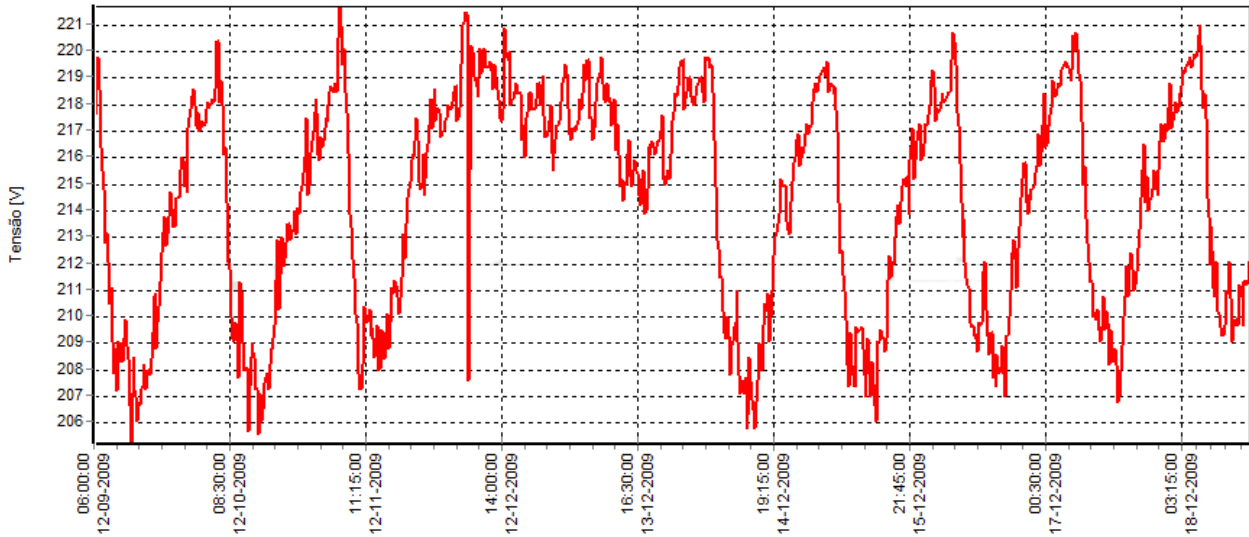


Figura 14 – Níveis de tensão da rede no período compreendido entre 12 de setembro e 18 de dezembro de 2009.

Embora os efeitos das desconexões prejudiquem uma análise mais precisa do SFCR, ainda assim foi possível fazer algumas observações pontuais relevantes para a compreensão do comportamento dessa aplicação nas condições de Belém. A Tab. 2 mostra dados de produção de energia ao longo dos meses medidos, fator de capacidade considerando somente os dias que o sistema não desconectou e a produtividade do sistema em cada mês.

Tabela 2 – Dados mensais de produção de energia elétrica, fator de capacidade (FC) e produtividade do sistema (YF).

Mês	2009		
	Prod. Mensal [kWh]	FC* [%]	YF [kWh/kWp]
Agosto	55,759	14,751	35,402
Setembro	165,464	16,212	105,057
Outubro**	13,660	-	-
Novembro	76,405	14,438	48,511
Dezembro	79,718	11,716	50,615

* Os cálculos de FC consideram somente os dias em que não houve desconexão do sistema a fim de representar um valor mais próximo da operacionalidade do sistema. No mês de agosto, por exemplo, foi considerado o intervalo compreendido entre o dia 18 e o dia 27. No mês de setembro, foram desconsiderados os dias 03, 26 e 30, e desta forma foram calculados os valores de FC para os demais meses.

** Os valores de FC e YF para o mês de outubro não foram calculados porque o sistema operou sem desconexões somente no dia 3.

A produção de energia total no período avaliado da Tab. 2 foi de 391 kWh e o fator de capacidade médio foi de 14,28%. Vale ressaltar o fato de que a potência nominal do gerador FV (1,575 kWp) é inferior a potência nominal do inversor (2,5 kW), apresentando um Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI), ou seja, a relação entre a potência nominal do inversor e a potência nominal do gerador FV, igual a 1,6. Logo isto pode também influenciar em redução no desempenho do sistema, principalmente em dias nublados, onde ambas as eficiências de conversão e de seguimento de ponto de máxima potência são menores devido a um maior tempo de operação com baixo carregamento.

Entrando no mérito de uma análise qualitativa da energia elétrica injetada por um SFCR de pequena escala e seus impactos sobre a rede de distribuição, foram analisadas algumas medições pontuais, considerando um dia ensolarado (Fig. 15) e um dia nublado (Fig. 16), de variáveis como: Distorção Harmônica Total de corrente (THDi), fator de potência (FP), tensão RMS e energia acumulada ao longo do dia.

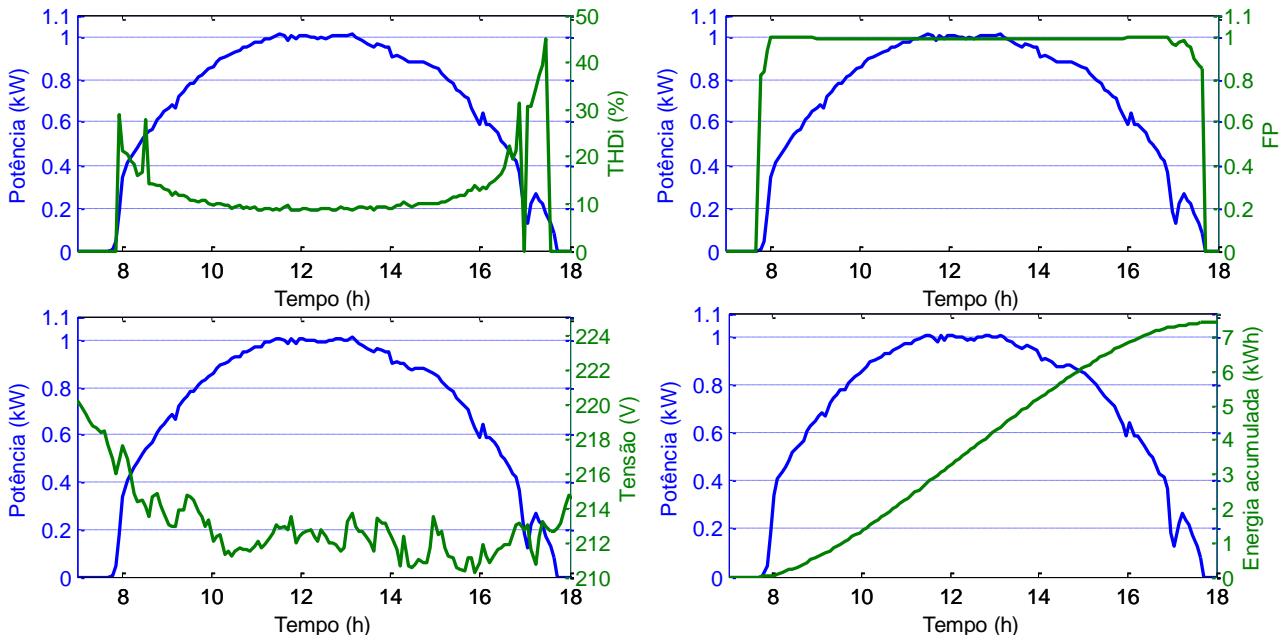


Figura 15 – Avaliação de parâmetros elétricos em um dia ensolarado (20/08/2009).

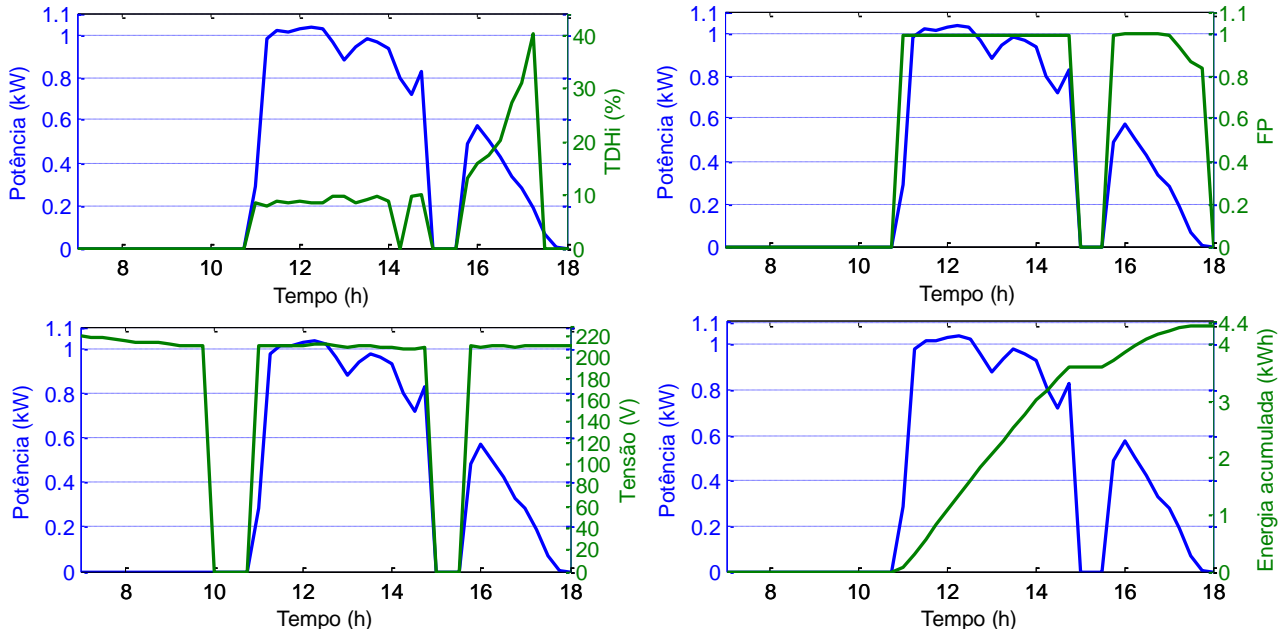


Figura 16 – Avaliação de parâmetros elétricos em um dia nublado (28/09/2009).

Avaliando os gráficos apresentados, nota-se que para valores baixos de potência de entrada do inversor (CC) a THDi é elevada, atingindo, para o dia ensolarado, valores superiores a 40% no final da tarde e, durante a operação no intervalo de 8 às 17 horas, a THDi mínima medida foi de aproximadamente 8,6%. Para o dia nublado, no final da tarde atinge-se 40% e, durante operação no intervalo de 11 até as 14 horas, o valor mínimo foi de 7,9%. Em todo caso, estes valores são superiores aos limites estabelecidos pela norma IEEE 929 (2000), a qual define que os harmônicos de correntes não devem ser superiores a 5%. A Fig. 17 mostra a curva de potência CA *versus* THDi como outra forma de analisar a THD de corrente.

Analisando o fator de potência, constata-se que na maior parte do tempo ele é próximo da unidade, como era de se esperar, pois o sistema gera somente potência ativa na maior parte do dia, enquanto que os reativos demandados pela edificação são supridos pela rede elétrica convencional.

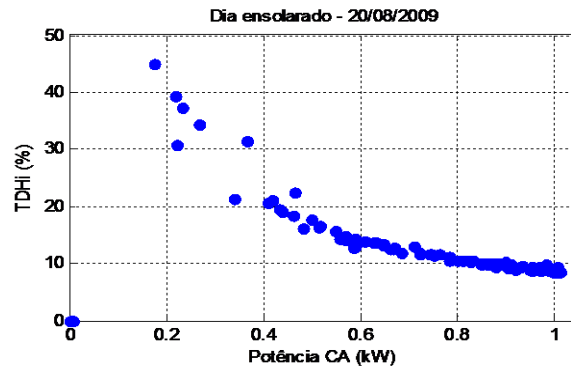


Figura 17 – Distorção harmônica de corrente como função da potência de saída do inversor para o dia ensolarado.

Em relação à tensão da rede elétrica, verificou-se que nos períodos correspondentes a operação do SFCR a tensão RMS é inferior a 220 V. Nos períodos em que não há geração, o valor da tensão RMS tende a se aproximar de 220 V. Isso pode ser explicado devido à existência, na saída do transformador que alimenta a edificação do GEDAE, de conexões elétricas provisórias que alimentam outras cargas, como por exemplo, para a construção de uma edificação ao lado do laboratório e para a construção de uma balsa, a uma distância aproximada de 100 metros dos fundos do GEDAE, de um laboratório de pesquisa da faculdade de engenharia mecânica. A Fig. 18 ilustra o transformador que alimenta tanto o laboratório do GEDAE e as outras cargas provisórias.

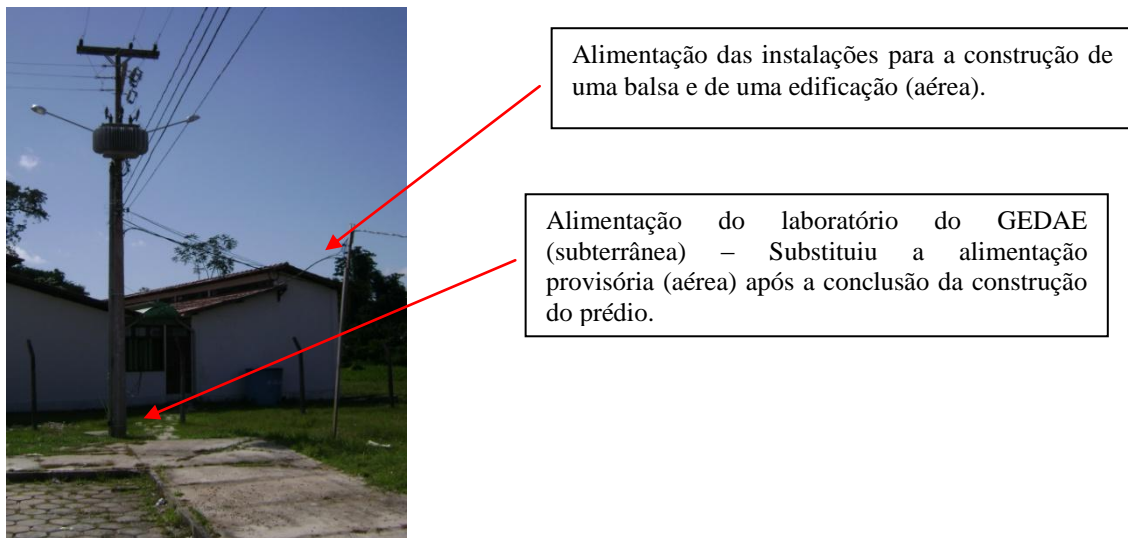


Figura 18 – Vista lateral do GEDAE mostrando transformador que alimenta a edificação.

Para caracterizar o inversor Solete 2500 é necessário utilizar dados de potência CC e CA medidas pelo sistema de aquisição de dados. Utilizando dados de 06/12/2009, calculou-se a curva de eficiência do inversor (%) – razão da potência de entrada pela de saída do inversor – como função da potência de saída (CA), conforme mostra a Fig. 19.

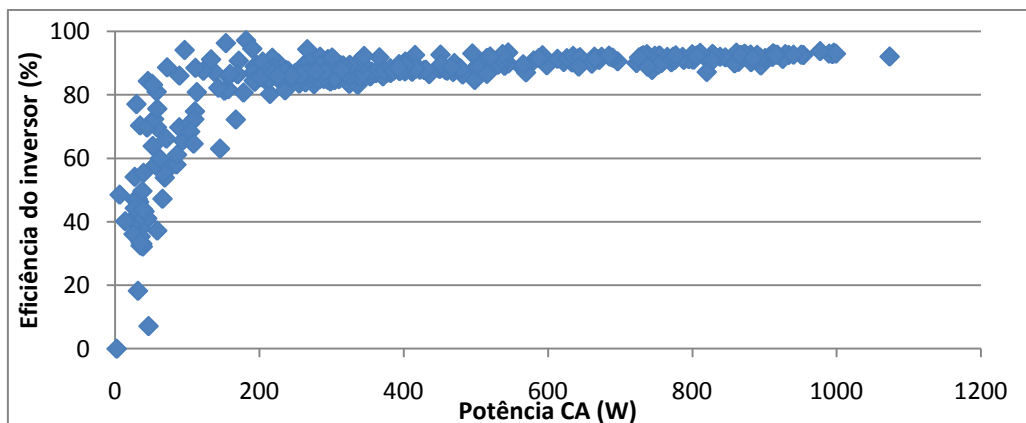


Figura 19 – Curva medida de eficiência do inversor *versus* potência de saída (CA).

É possível observar que valores altos de eficiência de conversão, próximos de 100%, são encontrados para um baixo carregamento do inversor. Isso está relacionado aos erros de medição que ocorrem em baixas potências (usualmente inferiores a 10% da potência nominal do inversor). Ressalta-se que estão sendo feitas correções no condicionamento do sinal a fim de atenuar tal erro. Para outros valores de potência de saída, a eficiência de conversão se aproxima do valor indicado pelo fabricante, que é de 94%.

Após o período em que foram efetuadas as medições com o sistema de aquisição de dados, as desconexões do inversor do SFCR se tornaram mais frequentes. Desse modo, uma análise mais criteriosa do funcionamento do sistema fica comprometida, uma vez que não há continuidade na geração de energia, o que ocasiona uma significativa diminuição da contribuição energética do SFCR.

Para tentar mitigar o problema das desconexões, foi requisitada junto à prefeitura do campus da UFPA a retirada das cargas provisórias do transformador que deveria ser exclusivo para atender a demanda do laboratório do GEDAE. Além disso, um novo inversor, de uma marca mais consolidada no mercado, será adquirido pelo laboratório.

5. CONCLUSÕES

Os SFCR's são uma aplicação bastante promissora da tecnologia FV, uma vez que tem as vantagens da geração distribuída (próxima ao consumo) e não necessitam de dispositivos acumuladores, já que a rede elétrica absorve a energia que não é consumida da pela carga local. O sistema abordado neste trabalho é pioneiro nesse tipo de aplicação na região amazônica brasileira. Desse modo, estudos da operacionalidade dos SFCR's considerando as particularidades da região amazônica trazem resultados em termos de contribuição energética, qualidade da energia gerada e dos efeitos da rede elétrica convencional na operação dos sistemas (e vice-versa). Além disso, os resultados obtidos podem auxiliar no diagnóstico de possíveis problemas, o que aumenta a confiabilidade dos SFCR's, promovendo a divulgação positiva da tecnologia.

REFERÊNCIAS

- Figueiredo, Gilberto e Vasconcelos, F. M., 2009. Metodologia de Análise e Projeto de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Baixa Tensão e Avaliação de Desempenho de um Sistema de 1,575 kWp. Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA, Belém.
- IEEE 929, 2000. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems. Aprovada em 30 de Janeiro de 2000.
- Macêdo, W. N., 2006. Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede. Tese de Doutorado, USP, São Paulo.
- Macêdo, W. N., Figueiredo, Gilberto, Pinho, J. T. e Zilles, Roberto, 2008. Experiências com o Primeiro Sistema Fotovoltaico Integrado à Edificação e Conectado à Rede na Região Amazônica Brasileira. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Latino Americana da ISES, Florianópolis.
- Macêdo, W. N. e Zilles, Roberto. 2009. Influence of the Power Contribution of a Grid-Connected Photovoltaic System and its Operational Particularities. Energy for Sustainable Development, nº 13.
- Manito, A. R. A., 2009. Sistema de Monitoramento energético de uma Edificação Eficiente. Trabalho de Conclusão de Curso, UFPA, Belém.

Abstract. *This work presents the operational analysis of the Grid-Connected Photovoltaic System (GCPVS) installed at the Laboratory of Renewable Energies and Energy Efficiency of the Group of Studies and Development of Energetic Alternatives. The system is composed by a roof integrated 1.575 kWp photovoltaic generator and a 2.5 kW inverter for grid connection. A data acquiring system was developed to facilitate the operational analysis of the GCPVS as well as help in detecting possible problems. The data acquiring system components and the operational data resulted of the monitoring are presented.*

Key words: *Grid-connected photovoltaic system, Architecture integration and Data acquisition.*