

DESENVOLVIMENTO DE BANCADA DIDÁTICA PARA DEMONSTRAÇÃO DA CONEXÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA DE BAIXA TENSÃO

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

André Felipe Pacheco Costa – pacheco_felipe97@hotmail.com

Marcos André Barros Galhardo – galhardo@ufpa.br

João Tavares Pinho – jtpinho@ufpa.br

Wilson Negrão Macedo – wnmacedo@ufpa.br

Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará

Resumo. Este artigo descreve uma bancada didática para demonstração da conexão e operação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica de baixa tensão, desenvolvido com o propósito de auxiliar em cursos de capacitação, atividades acadêmicas, além da divulgação da tecnologia presente em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. A bancada é constituída basicamente por um módulo fotovoltaico e duas maletas contendo um microinversor de 215 W, um banco de cargas e displays (em ambas maletas) para visualização das principais grandezas elétricas envolvidas no processo, além da monitoração da irradiância incidente no plano do módulo fotovoltaico e da temperatura na parte posterior do módulo. A bancada, construída na forma de kit itinerante, permite relativa mobilidade, tornando possível seu uso em diversos locais.

Palavras-chave: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Capacitação em Energia Solar Fotovoltaica, Microinversor.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR) já são uma realidade em diversos países do mundo e vêm ganhando cada vez mais espaço no território nacional. O avanço tecnológico do setor no Brasil é fato, ainda que apresente momentos de dificuldades (CEPEL, 2014). Os aumentos recorrentes no custo da energia elétrica e a redução dos custos de implantação desses sistemas vêm atraindo crescente número de consumidores no mercado brasileiro.

A necessidade de mão-de-obra especializada no setor cresce proporcionalmente ao aumento deste interesse. Portanto, frente ao imperativo crescimento das aplicações conectadas à rede no país, faz-se necessário o desenvolvimento de mecanismos de difusão e capacitação, despertando o interesse de alunos desde o ensino médio até a pós-graduação. Trabalhos que busquem a difusão do conhecimento de SFCR são importantes como forma de capacitar recursos humanos para a área, além de ser fonte de divulgação da tecnologia.

O presente trabalho trata de uma bancada didática desenvolvida de forma a ser facilmente desmontada, transportada e instalada, visando demonstrar os princípios básicos de funcionamento de um SFCR. Sua proposta é de levar o conhecimento deste tipo de tecnologia aos locais em que ainda não exista tal instalação, como escolas e centros técnicos e educacionais, principalmente em regiões interioranas. A bancada pode ser utilizada como ferramenta de auxílio em cursos de capacitação, além de aulas relacionadas ao tópico de energia solar fotovoltaica em geral para diversos níveis acadêmicos.

Em Neto et. al. (2010) é apresentada a experiência do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo no emprego de *kit* didático, e evidenciada a importância da sua aplicação. Nesse caso utilizou-se um inversor tipo *string*, que necessitava um número significativo de módulos em série, além de um painel para montagem dos equipamentos de demonstração, como medidores, inversores, etc. Essa característica tornava a logística e a instalação do *kit* para a demonstração da operação do SFCR mais dificultosa.

No presente trabalho buscou-se utilizar equipamentos de baixo custo e plataforma de prototipagem eletrônica com código aberto, de modo que seja possível realizar aprimoramentos e atualizações com maior liberdade e facilidade. Vale citar ainda a necessidade de aperfeiçoamentos da ferramenta, de modo a obter-se um produto final mais prático, com maior mobilidade e robustez.

2. DESCRIÇÃO DA BANCADA

Um sistema fotovoltaico conectado à rede tem como principais elementos: gerador fotovoltaico, inversor (condicionador de potência) e rede elétrica. A estrutura da bancada foi desenvolvida com base nestes componentes,

tendo um módulo fotovoltaico (que neste caso é o gerador) conectado a um microinversor (responsável pelo condicionamento de potência e sincronização com rede elétrica local) abrigado em uma maleta. Esta maleta por sua vez está conectada a outra maleta contendo um banco de cargas que simula a demanda de uma edificação. Esta última maleta é conectada à rede elétrica para onde a energia fotogerada poderá fluir, caso a demanda da edificação seja igual a zero ou inferior à potência gerada pelo micro SFCR. A Fig. 1 mostra o diagrama unifilar com os elementos básicos da bancada.

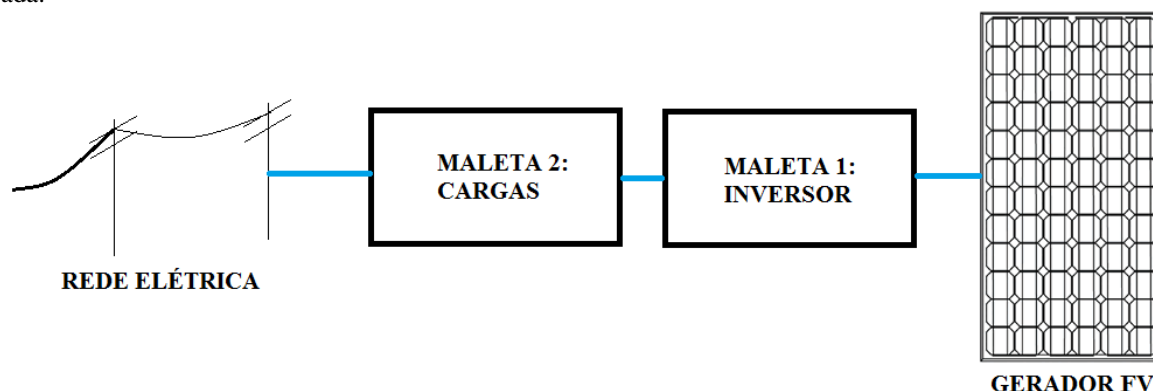


Figura 1- Disposição dos elementos na bancada.

O *kit* foi construído em duas maletas (dimensões de 455 mm por 330 mm por 152 mm, para comprimento, largura e altura, respectivamente), de modo que se obtenha relativa mobilidade, possibilitando um alcance maior em se tratando de atividades didáticas relacionadas ao estudo de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Cada maleta contém partes fundamentais para o funcionamento do *kit* e deve ser utilizada em conjunto durante o processo de demonstração.

Para completo funcionamento do *kit* é necessário ainda um gerador fotovoltaico com características elétricas adequadas aos valores nominais do microinversor presente em uma das maletas, além de acesso à rede elétrica local em barramento ou ponto de tomada de 220 V_{rms}, de modo que seja possível a plena operação do microinversor.

2.1 Maleta de interface à rede elétrica (MALETA 1)

Pode-se encontrar no mercado inversores para conexão à rede para aplicações que demandam diversos níveis de potência. Em geral, inversores para conexão à rede são projetados para operar em conjunto com uma associação de módulos fotovoltaicos, resultando em sistema com massa e volume não adequados com a ideia proposta de um *kit* portátil e itinerante. Com a popularização dos microinversores, que são inversores de baixa potência, projetados para operar de maneira modular (um módulo fotovoltaico por inversor), a proposta do *kit* itinerante tornou-se viável, uma vez que os microinversores apresentam volume menor e podem ser facilmente embarcados na maleta com as dimensões já citadas anteriormente.

O microinversor presente no *kit* é do fabricante *Enphase Energy*, modelo *M215*, e tem algumas de suas principais características elétricas listadas na Tab. 1. Como características físicas, tem aproximadamente 17 cm x 17 cm x 3 cm (comprimento, altura, largura) desconsiderando o suporte de montagem. Na Fig. 2 mostra-se o microinversor incorporado à maleta pertencente ao *kit* desenvolvido.

Tabela 1 - Especificações elétricas do microinversor *Enphase M215*.

| | |
|--|----------------------------|
| Potência de entrada recomendada (STC) | 190 – 270 W |
| Tensão c.c. máxima | 48 V |
| Faixa de Tensão de rastreamento de máxima potência | 27 – 39 V |
| Corrente c.c. máxima | 15 A |
| Potência máxima de saída | 225 W |
| Potência nominal de saída | 215 W |
| Corrente nominal de saída | 1,03 A _{rms} |
| Tensão nominal c.a. | 183 – 229 V _{rms} |



Figura 2- Microinversor utilizado na bancada.

Para a monitoração do SFCR, os valores de tensão e corrente elétricas são adquiridos tanto no barramento de entrada quanto no de saída do inversor. A temperatura na parte posterior do módulo fotovoltaico e a irradiância também são parâmetros obtidos, permitindo a observação da variação das grandezas elétricas em função da temperatura e da irradiância solar no local. Todos os valores adquiridos são exibidos em tempo real em *displays* de LCD após o tratamento dos dados em um microcontrolador.

Para medir dados de irradiância, utiliza-se uma célula de referência de silício monocristalino modelo *Spektron 210*, do fabricante *TRITEC*, com fornecimento de $74,2 \text{ mV}$ a 1.000 W/m^2 . Para medir a temperatura na parte posterior do módulo, acopla-se um sensor de temperatura do tipo PT 1000 B, do fabricante *Sol.Connect*, ao módulo durante a demonstração. A Fig. 3 mostra os sensores de irradiância e temperatura utilizados.

O sensor de temperatura funciona como uma resistência variável de precisão, o modelo PT1000 apresenta 1000 ohms de resistência elétrica quando submetido a uma temperatura de 0°C , aumentando a resistência conforme o aumento da temperatura. Para leitura da resistência deste sensor foi construído um circuito em ponte de Wheatstone, fornecendo ao microcontrolador um nível de tensão proporcional à resistência do PT1000. A Fig. 4 ilustra o circuito utilizado.

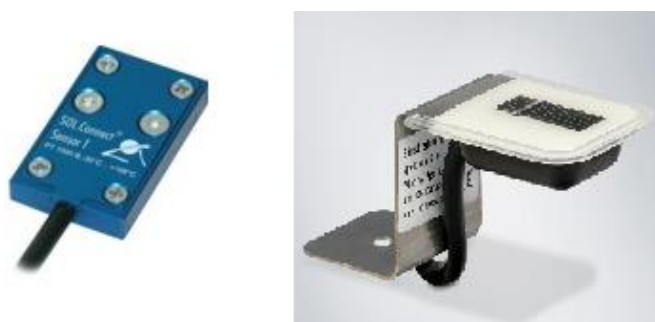


Figura 3- Sensores de temperatura e irradiância.

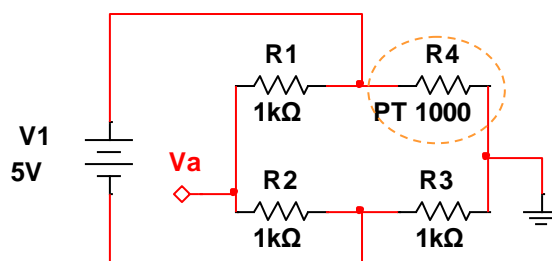


Figura 4- Circuito ponte de Wheatstone.

Para medir a tensão de entrada do inversor, um simples circuito divisor de tensão foi projetado, a fim de adequar o nível de tensão para que possa ser lido pelo conversor analógico-digital do microcontrolador. A aquisição de dados de corrente é realizada com o uso de garra de corrente para osciloscópio. A garra utilizada (modelo *HR-30* do fabricante *Minipa*) faz medições c.a. e c.c., com resolução de 100 mV/A , e tem como limite $30 \text{ A}_{\text{rms}}$. A Fig. 5 mostra a garra de corrente utilizada.



Figura 5- Garra de corrente para osciloscópio utilizada.

A medição de corrente na saída do inversor também é realizada com o auxílio da garra de corrente. Entretanto, o sinal de tensão gerado pela garra reproduz a forma de onda da corrente na saída do inversor. Para determinar o valor *rms* da corrente, o algoritmo implementado no microcontrolador utiliza os dados de uma curva de calibração (obtida em laboratório com o ensaio para diversos valores de carga). Para medição da tensão c.a. no barramento de saída do inversor, utilizou-se um circuito com optoacoplador para proteção do microcontrolador, conforme esquema ilustrado na Fig. 6. Novamente, o procedimento para cálculo do valor *rms* da tensão é baseado em uma curva de calibração (representando a relação entre a tensão real c.a. em função do sinal de saída do circuito) obtida por meio de um ensaio realizado com o auxílio de um variador de tensão c.a., *variac*.

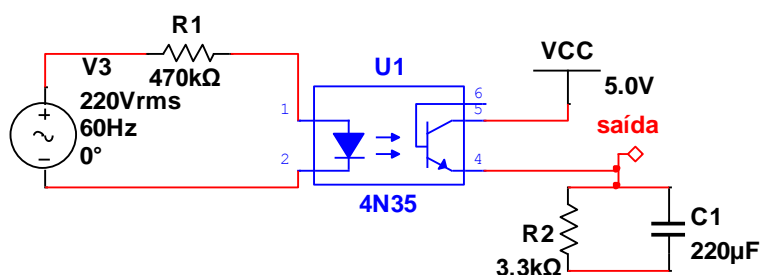


Figura 6- Circuito com optoacoplador para aquisição de dados de tensão a.c.

O sistema de aquisição e processamento de dados foi construído com base na plataforma *Arduino*, utilizando-se o microcontrolador *ATMEGA328P* do fabricante *ATMEL*. Confeccionaram-se placas de circuito impresso com o objetivo de embarcar o microcontrolador, os circuitos de condicionamento de sensores, o circuito de alimentação das placas e conexões para os *displays* de cristal líquido. A placa de circuito impresso presente na maleta que abriga o microinversor é apresentada na Fig. 7.

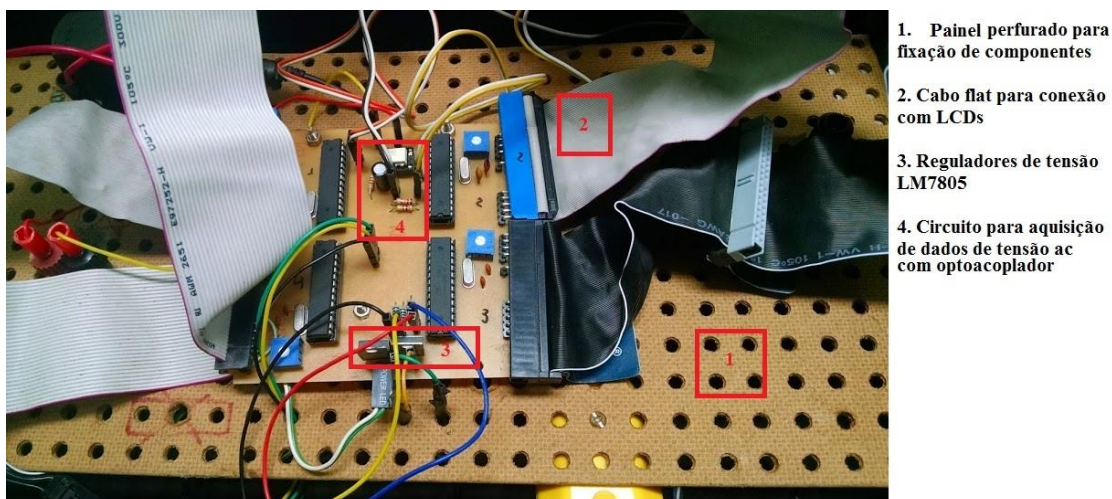


Figura 7- Placa de circuito impresso construída para a maleta que contém o microinversor.

Um dos *displays* é dedicado exclusivamente para mostrar a eficiência do inversor no processo de conversão de potência c.c. para c.a. Durante períodos em que o inversor está operando em níveis baixos de carregamento, perdas por autoconsumo tornam-se mais evidentes e afetam a eficiência do inversor (Macêdo, 2006). Não linearidades inerentes à operação do inversor distorcem a forma de onda de saída e, conseqüentemente, seu fator de potência é alterado. Como o cálculo de potência desenvolvido para o *kit* apresenta apenas a potência aparente, uma vez que o fator de potência não é

calculado, os resultados do cálculo de eficiência ilustrados no *display* somente são válidos em situações em que o inversor esteja operando com carregamento suficiente, tendendo a manter o fator de potência próximo de 100 %.

Na Fig. 8 está ilustrado o diagrama de conexões para a maleta do inversor e na Fig. 9 mostra-se o painel desta maleta.

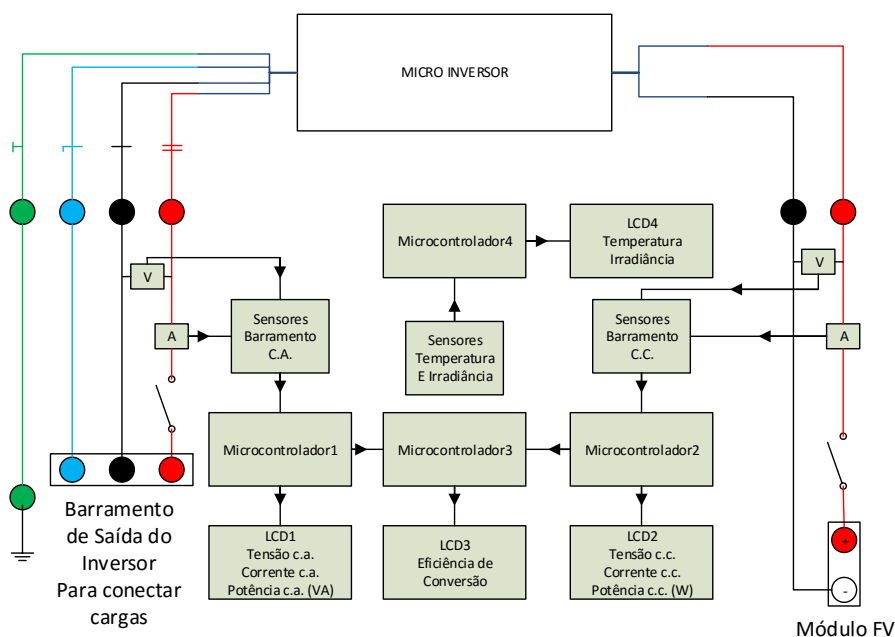


Figura 8- Diagrama de conexões da maleta com o inversor.

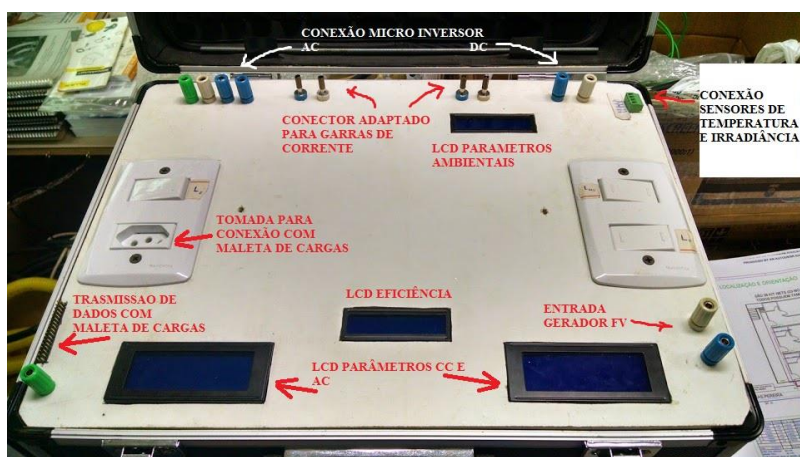


Figura 9- Painel da maleta que contém o microinversor.

2.2 Maleta de cargas (MALETA 2)

A segunda maleta pertencente à bancada didática contém cargas que são alimentadas pelo gerador fotovoltaico ou pela rede elétrica, dependendo da potência disponibilizada na saída do inversor e da demanda de carga. Três *displays* estão presentes nesta maleta: um que apresenta a tensão e a corrente na saída do microinversor, outro para a tensão e a corrente na carga, além de um *display* que mostra valores provenientes da rede elétrica. Desta maneira, é possível observar a contribuição da geração fotovoltaica na alimentação das cargas e a injeção de potência na rede elétrica de baixa tensão (quando a geração for maior que a demanda).

Um conjunto de cinco lâmpadas dicróicas, 127 V_{rms} e 35 W de potência cada, simulam as cargas do sistema. É importante notar que o barramento da rede convencional ao qual o microinversor está conectado é de 220 V_{rms}, sendo necessário utilizar um transformador 220 V / 127 V para ligar as cargas. Adicionalmente às lâmpadas, ainda se tem disponível uma tomada, permitindo a inserção de outra carga externa à maleta na tensão de 220 V_{rms}. Para isso, construiu-se ainda um banco de cargas com três lâmpadas incandescentes de 220 V_{rms} e 100 W cada, permitindo assim operação do sistema com carga, sem a necessidade de ligar o transformador.

O sistema de aquisição de dados é semelhante ao utilizado na maleta com o microinversor, onde três garras de corrente são necessárias para se obterem os dados das correntes: proveniente da rede, de consumo das cargas, e da saída do microinversor. Considera-se que o barramento está sob mesma tensão e, dessa forma, utiliza-se o mesmo sinal

proveniente do circuito com optoacoplador apresentado anteriormente. Na Fig. 10 mostra-se a placa de circuito impresso confeccionada para esta maleta, já acoplada em sua estrutura e conectada aos sensores e *displays*.

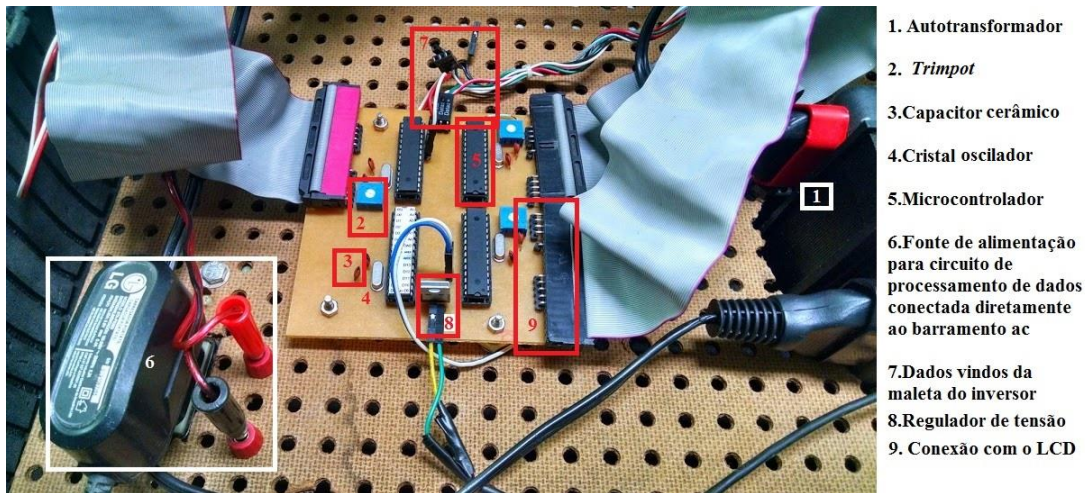


Figura 10- Placa de circuito impresso construída para a maleta com as cargas.

Na Fig. 11 está ilustrado o diagrama de conexões para a maleta de cargas, e na Fig. 12 mostra-se o painel desta maleta, destacando-se as cargas embarcadas, a tomada para utilização de cargas externas, a entrada da rede elétrica, etc.

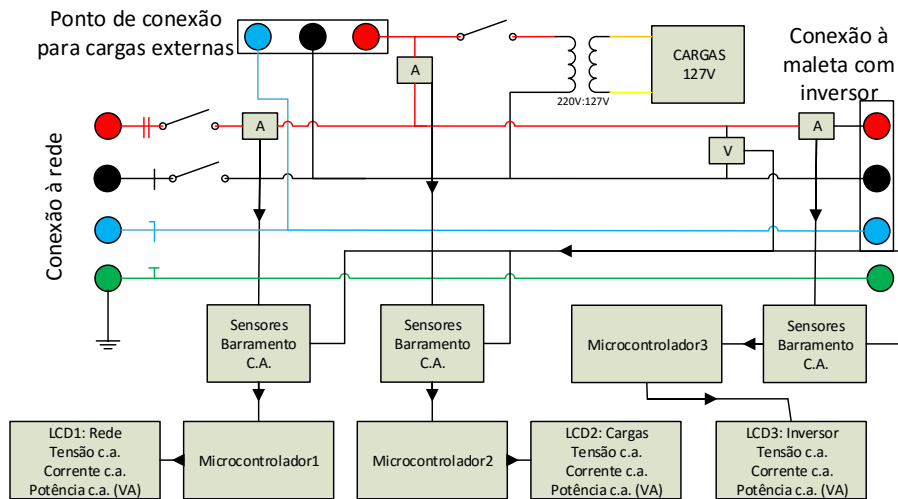


Figura 11- Diagrama de conexões da maleta que contém as cargas.

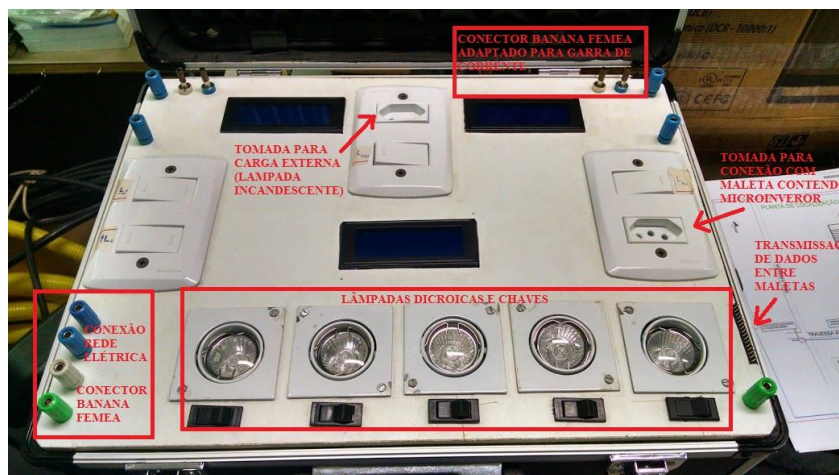


Figura 12- Painel da maleta que contém as cargas.

3. APLICABILIDADE

A operação conjunta das maletas em testes em laboratório pode ser observada na Fig. 13. Operacionalmente, a bancada apresentou bons resultados, sendo capaz de ajudar a exemplificar os conceitos básicos presentes na operação de um SFCR. As demonstrações são ainda mais evidentes em condições de potência de saída próxima à nominal do microinversor, onde o fator de potência é praticamente unitário, e utilizando-se cargas lineares no barramento c.a. Neste caso, a análise das contribuições de cada fonte que compõe o sistema tem melhores resultados, uma vez que os efeitos causados pelo fator de potência e distorções na forma de onda podem ser relativizados.

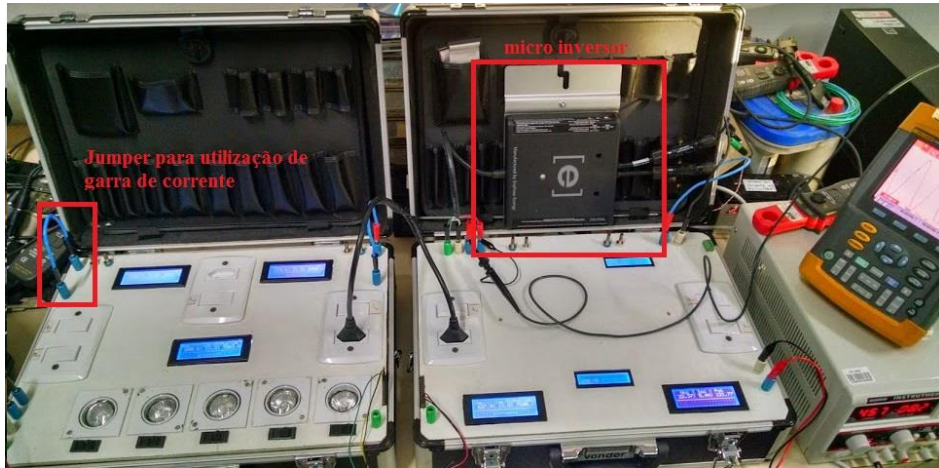


Figura 13- Kit operando em laboratório.

Sob condições reais de operação, a bancada foi utilizada em várias oportunidades. Destaca-se na Fig. 14 uma atividade de capacitação realizada no Instituto Mamirauá, estado do Amazonas, e em atividades desenvolvidas durante a disciplina Sistemas Fotovoltaicos, ofertada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA, em Belém.



Figura 14- Demonstração da operação da bancada itinerante durante um curso de capacitação no Instituto Mamirauá – AM e durante uma aula prática de uma disciplina da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA.

4. CONCLUSÃO

A bancada vem sendo utilizada em cursos de capacitação, aulas de pós-graduação e em seminários relacionados à geração fotovoltaica, com um impacto muito positivo. Convém mencionar que em todas as ocasiões em que a bancada foi apresentada, a aceitação e participação dos presentes foi notável, pois muitos deles nunca haviam visto um SFCR real e possuíam muitas dúvidas, principalmente sobre funcionamento dos fluxos de energia no sistema formado pelo

SFCR e a rede elétrica. Dessa forma, a bancada foi de grande importância para esclarecer as dúvidas dessas pessoas, mostrando-se um meio efetivo de divulgação.

Para aprimorar essa ferramenta, tem-se como próximas atividades melhorar o sistema de aquisição de dados, permitindo o cálculo do fator de potência, bem como estimar a distorção harmônica total. Tais avanços permitem uma análise mais detalhada do processo de conversão de energia que ocorre em um SFCR, bem como maior exatidão nos resultados sob diversas condições de operação. Outro fator a ser aprimorado no projeto é aumentar a robustez do *kit*, de modo que durante viagens e transporte as maletas estejam menos susceptíveis a danos como, por exemplo, choques mecânicos.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através do edital Chamada CNPq/VALE S.A. Nº 05/2012 – Forma-Engenharia e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA), além do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE/UFPA).

REFERÊNCIAS

- Neto, A. F. C. P.; Almeida, M.; Mocelin, A. R., Zilles, R.. Kit de Demonstração da Conexão e Operação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede. III Congresso Brasileiro de Energia Solar - Belém, 21 a 24 de setembro de 2010.
- Arduino, Página de Referência para programação. <<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage>>. Acesso em 18/11/2015.
- Cepel-Cresesb, Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos. Ministério de Minas e Energia, 2014, Rio de Janeiro.
- Cuin, M, Sensor de tensão elétrica – versão 2. <<http://www.cuin.com.br/2013/06/sensor-de-tensao-eletrica-versao-2/>>. Acesso em 18/11/2015.
- Enphase, Enphase M215. Folha de dados do fabricante. Enphase Energy, 2015.
- Macêdo, W. N.. Análise do Fator de Dimensionamento do Inversor Aplicado a Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Tese de Doutorado, PIPGE, USP, São Paulo, 2006.
- Macêdo, W. N.; Torres, P. F.; Pontes, S. S. N.; Júnior, W. B.; Cavalcante, R. L.; Galhardo, M. A. B.; Pinho, J. T. Análise da eficiência de um microinversor conectado à rede elétrica. In: Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 5, 2014, Recife. Anais eletrônicos... São Paulo.
- Open Energy Monitor, 4xMultiplexedRTDTemperatureModule. <<http://openenergymonitor.org/emon/node/75>>. Acesso em 18/11/2015.

DEVELOPMENT OF A DIDACTIC BENCH FOR DEMONSTRATION OF CONNECTION AND OPERATION OF LOW VOLTAGE GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract. *This paper describes a didactic bench to demonstrate the connection and operation of low voltage grid-connected photovoltaic systems, developed with the purpose of assisting in training courses, academic activities and disseminating the technology present in grid-connected photovoltaic systems. The bench is made basically by a photovoltaic module and two briefcases containing a 215 Wp microinverter, a load bank and displays (in both briefcases) to visualize the main electrical quantities involved in the process, furthermore, incident irradiance at the plane of the module and temperature at the back of the module are also monitored. The bench, built as an itinerant kit, allows relative mobility, making possible its usage in several locations.*

Key words: *Grid-Connected Photovoltaic Systems, Training in Solar Photovoltaic Energy, Micro-inverter.*