

# UNIDADE DE CAPACITAÇÃO E DIFUSÃO DE MINIRREDE FOTOVOLTAICA-BATERIA-DIESEL-REDE ELÉTRICA

André Ricardo Mocelin – mocelin@iee.usp.br

Roberto Zilles – zilles@iee.usp.br

Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia

**Resumo.** Este documento descreve a unidade de capacitação e difusão de minirredes do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (LSF/IEE-USP). A minirrede instalada é alimentada por um sistema híbrido composto por módulos fotovoltaicos, baterias chumbo-ácido, gerador elétrico movido a diesel e rede elétrica convencional. A implementação deste projeto ocorre no contexto da consolidação de um Programa Brasileiro de Formação e Certificação de Instaladores de Sistemas Fotovoltaicos de Pequeno e Médio Porte, do qual o LSF/IEE-USP é um dos proponentes. A instalação desse sistema híbrido é resultado de um projeto financiado pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) e do Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia (CNPq).

**Palavras-chave:** Sistemas Híbridos, Eletrificação Rural

## 1. INTRODUÇÃO

Para muitas comunidades isoladas brasileiras, principalmente na Região Amazônica, prover energia elétrica via extensão de redes convencionais é inviável devido ao seu isolamento geográfico. Para o atendimento de tais comunidades, as opções mais difundidas atualmente são: Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFIs), minirrede com gerador a óleo diesel ou minirrede híbrida (gerador a óleo diesel, fontes renováveis de energia e baterias). No entanto, a ausência de estudos sistemáticos que deem subsídios ao processo de decisão de atendimento SIGFI *versus* minirrede aumenta o risco de fracasso das iniciativas de eletrificação rural.

As experiências do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo mostram que a classe de atendimento mínimo SIGFI13, com disponibilidade mensal garantida de 13 kWh, é suficiente para que um domicílio use energia elétrica para lâmpadas, televisão, rádio, ventilador e outros aparelhos de baixa potência e/ou uso esporádico. Contudo, a experiência adquirida também revela que em algumas situações sistemas centralizados com minirredes podem apresentar melhores desempenhos (Mocelin, 2007).

No âmbito da universalização de energia elétrica, o uso de minirredes híbridas tem despertado interesse de concessionárias de energia elétrica por permitir o aproveitamento dos recursos renováveis existentes na comunidade. Neste sentido, a energia fotovoltaica é uma alternativa atraente para as comunidades porque é alimentada por fonte energética universalmente acessível – o sol – e não depende do fornecimento contínuo de insumos externos, diferentemente do diesel necessário a um gerador elétrico.

Neste contexto, este trabalho tem por objetivos apresentar a minirrede fotovoltaica-bateria-diesel-rede elétrica juntamente com o sistema de monitoramento e controle que permite avaliar as diferentes estratégias de operação da minirrede instalada. Com a experiência adquirida no decorrer do trabalho, pretende-se contribuir na formulação de critérios para decisão sobre opções de atendimento em comunidades isoladas, bem como na discussão sobre a regulamentação de sistemas híbridos no Brasil.

## 2. MINIRREDES ALIMENTADAS POR SISTEMAS HÍBRIDOS

Visando ao atendimento de comunidades isoladas, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio da Resolução Normativa nº 83 de 20 de Setembro de 2004, regulamentou os Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFIs), prevendo várias classes de atendimento.

Uma opção para os SIGFIs são os Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares (SFDs), nos quais o LSF/IEE-USP tem trabalhado tanto na implementação de projetos em comunidades isoladas, como no monitoramento de protótipos instalados na sua infraestrutura laboratorial. A experiência acumulada no tema SIGFI aliada a uma extensa base de dados de consumo e perfil de carga em sistemas fotovoltaicos domiciliares permitem identificar algumas vantagens e limitações desses sistemas.

Por outro lado, uma opção bastante difundida para eletrificação de comunidades remotas é a utilização de geradores a diesel conectados a minirredes elétricas. Em alguns casos, além do gerador a diesel, tais minirredes possuem parte de sua geração utilizando as fontes solar ou eólica, constituindo um sistema elétrico híbrido.

Tradicionalmente, a maioria das minirredes híbridas existentes no Brasil utiliza acoplamento misto (corrente contínua e alternada, c.c. e c.a.), no qual as fontes renováveis de energia são acopladas num barramento c.c. com o banco de baterias funcionando como componente central, semelhante ao indicado na Fig. 1.

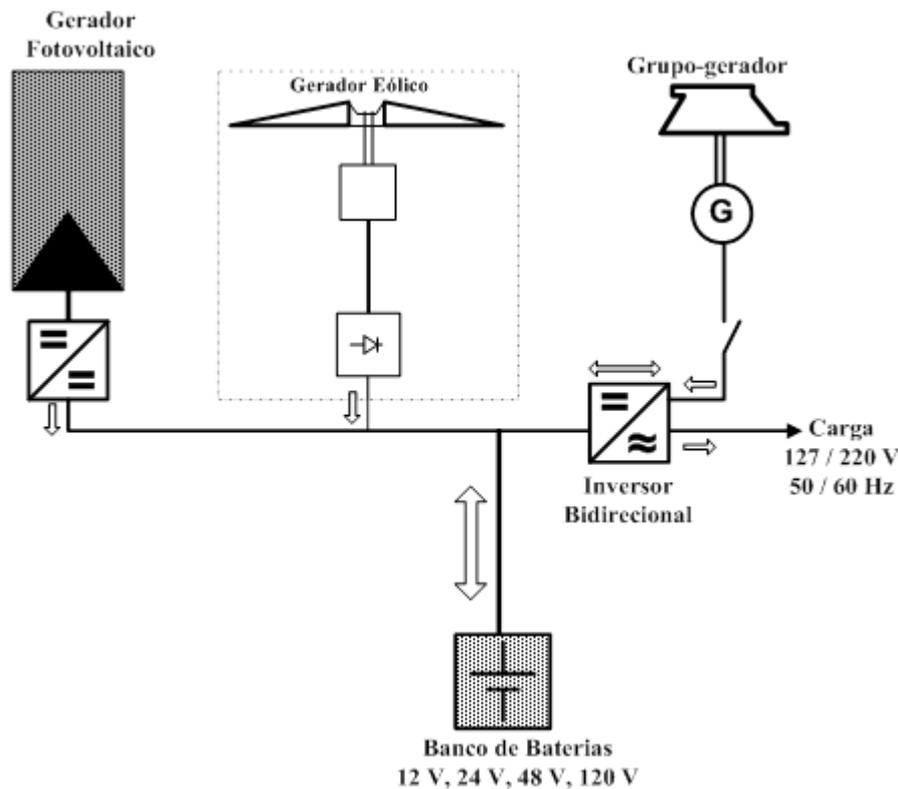


Figura 1 - Sistema híbrido para fornecimento de energia elétrica em c.a. com as componentes solar e eólica ligadas diretamente no lado c.c., e acoplamento misto c.c.- c.a.

Neste tipo de sistema, as cargas em c.a. são alimentadas com o auxílio de um inversor, que, em alguns casos, também age como carregador de bateria alimentado por um gerador c.a. (por exemplo, grupo gerador a diesel). No entanto, esses sistemas possuem um sistema c.c. mais complicado de ser projetado, fazendo com que a energia produzida por uma fonte c.c. ou c.a. fique limitada pela eficiência dos equipamentos de condicionamento de potência (retificador, inversor, banco de baterias, etc.).

Uma alternativa à configuração mista é trabalhar com todas as cargas e geradores acoplados de forma independente num barramento c.a., conforme mostra a Fig. 2. Todos os componentes que constituem o sistema isolado estão conectados diretamente ao barramento c.a., controlado pelo inversor bidirecional. Esses componentes podem ser consumidores de eletricidade como fontes de produção de eletricidade. Em períodos com alta produtividade (por exemplo, períodos com níveis elevados de produção e baixas demandas de eletricidade no lado do consumidor) o inversor bidirecional extrai potência do barramento c.a. e carrega o banco de baterias. Em períodos com demanda de eletricidade elevada do lado do consumidor, esse mesmo inversor extrai energia do banco de baterias e alimenta o barramento c.a. A possibilidade de utilização de vários inversores bidirecionais em paralelo permite suprir demandas elevadas de potência.

A comparação entre os sistemas com acoplamento misto c.c.- c.a. com acoplamento puramente em c.a. permite identificar que o acoplamento c.a. tem muitas vantagens, como por exemplo: padronização do acoplamento de diferentes componentes, compatibilidade com a rede elétrica convencional, simplificação do projeto do sistema e da operação de redes isoladas, aumento da confiabilidade do sistema elétrico de potência e maior flexibilidade na expansão do sistema.

Apesar das inúmeras vantagens, o acoplamento c.a. constitui uma tarefa desafiadora para a tecnologia de controle do fluxo de potência em minirredes isoladas com produção distribuída de fontes renováveis. Adiciona-se a ausência de estudos sistemáticos que deem subsídios ao processo de decisão de atendimento com sistemas individuais ou sistemas em minirredes, em particular quando todas as fontes estão conectadas no barramento c.a. do sistema híbrido fotovoltaico-bateria-diesel.

No que se refere aos geradores, dependendo do tipo de aplicação e das fontes de energia disponíveis, diferentes conversores de energias renováveis convencionais podem também ser integrados para a formação de um sistema híbrido de produção de eletricidade. Essa nova configuração simplifica o dimensionamento de sistemas com minirredes

isoladas, proporcionando um número maior de opções de componentes a serem empregados para a conexão modular direta no lado c.a.

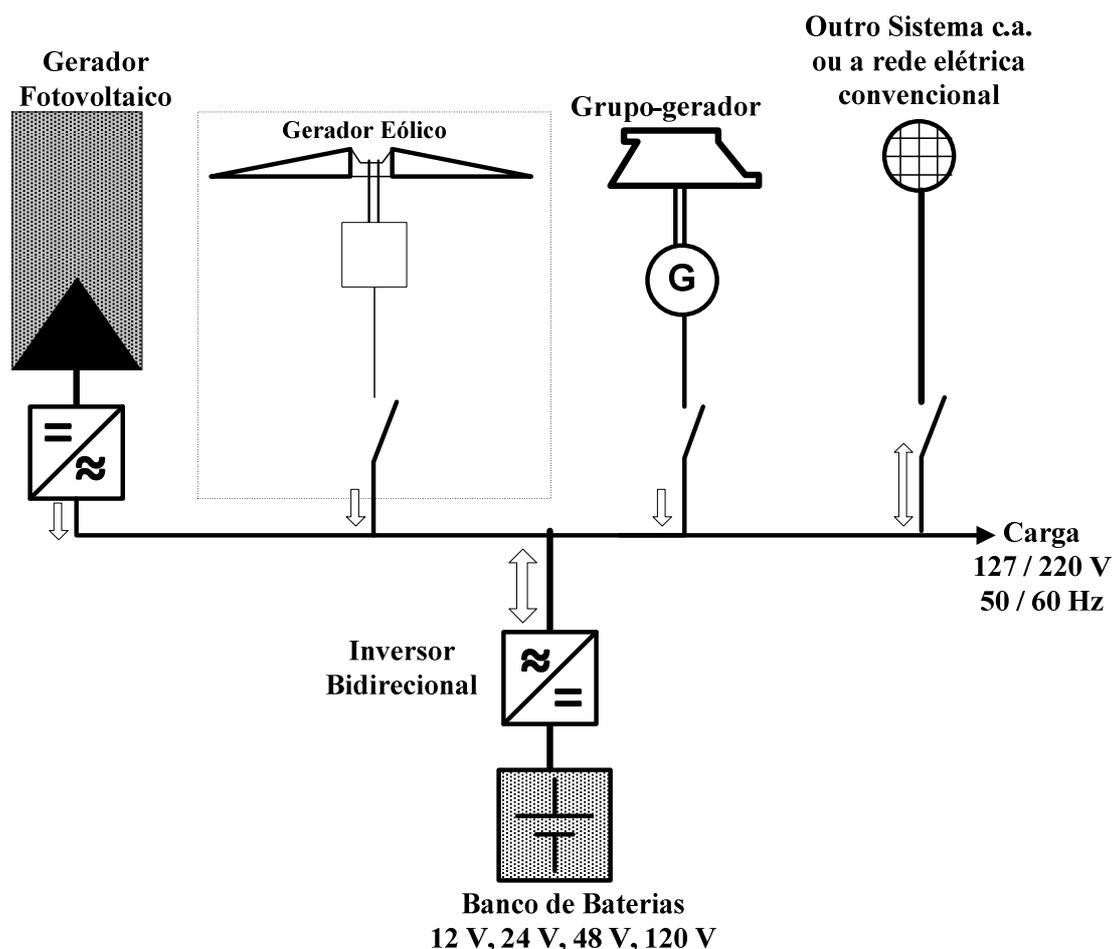


Figura 2 – Sistema híbrido com estrutura modularmente expansível com componentes acoplados diretamente no lado c.a.

Tais estruturas são usadas para atender qualquer demanda de energia elétrica, especialmente comunidades rurais, tais como as inúmeras comunidades espalhadas pela vasta Região Amazônica. Constata-se, então, que essa nova topologia tem um grande potencial de aplicação, especialmente em regiões de difícil acesso, bastante comuns na Região Norte do Brasil, onde a falta de condições apropriadas para extensão da rede é frequente.

Como mencionado anteriormente, o sistema modular vem trazendo muitas vantagens relacionadas à simplificação da engenharia do sistema (dimensionamento, instalação, expansão e compatibilidade) e, conseqüentemente, minimizando o custo específico do sistema.

Finalmente, para uma análise sistematizada da questão levantada acima, foi montado um ambiente laboratorial que permite a formação de diferentes sistemas híbridos (monofásicos, bifásicos e trifásicos) com a possibilidade de variar a demanda conforme o perfil de carga requerido. A implementação de tal infraestrutura, em conjunto com os protótipos de SIGFI existentes no LSF/IEE-USP, possibilita o monitoramento em tempo real das duas alternativas de atendimento, SIGFI ou minirrede.

### 3. MINIRREDE DO LSF/IEE-USP

Sistemas híbridos que aproveitam ao máximo o recurso solar e, assim, poupam energia do banco de baterias e/ou utilizam menos óleo diesel têm despertado interesse de concessionárias de energia elétrica e de laboratórios de pesquisas por se mostrarem uma boa opção de atendimento para comunidades remotas do Brasil.

No entanto, ainda faltam estudos que avaliem seus aspectos técnicos e de gestão. Mesmo na esfera regulatória, o tema minirrede ainda permanece em ampla discussão e, na econômica, os dados dos custos operacionais de minirredes com acoplamento c.a. são incipientes. Além disso, a falta de recursos humanos qualificados em todas as etapas de um processo de eletrificação com sistema híbrido e a carência de infraestrutura laboratorial para a formação e qualificação de profissionais especializados agravam ainda mais o tema minirredes no país (Morante *et al.*, 2006).

Portanto, a implantação e a gestão de uma minirrede de distribuição de energia elétrica com acoplamento c.a. no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do IEE/USP podem contribuir para a elaboração de procedimentos de operação e

gestão de minirredes bem como para a formação de profissionais especializados nesta tecnologia. No que se refere à formação de recursos humanos na área fotovoltaica, convém informar que a unidade de capacitação montada será utilizada para os mais diversos treinamentos, sobretudo àqueles relacionados ao Programa Brasileiro de Formação e Certificação de Instaladores de Sistemas Fotovoltaicos de Pequeno e Médio Porte, conforme descrito em Zilles *et al.* (2009).

O objetivo geral da unidade de capacitação implantada no LSF é o estudo e avaliação das estratégias de operação e gestão de minirrede fotovoltaica-bateria-diesel-rede elétrica visando à otimização dos recursos disponíveis. A Fig.3 ilustra a configuração da minirrede do LSF/IEE-USP.

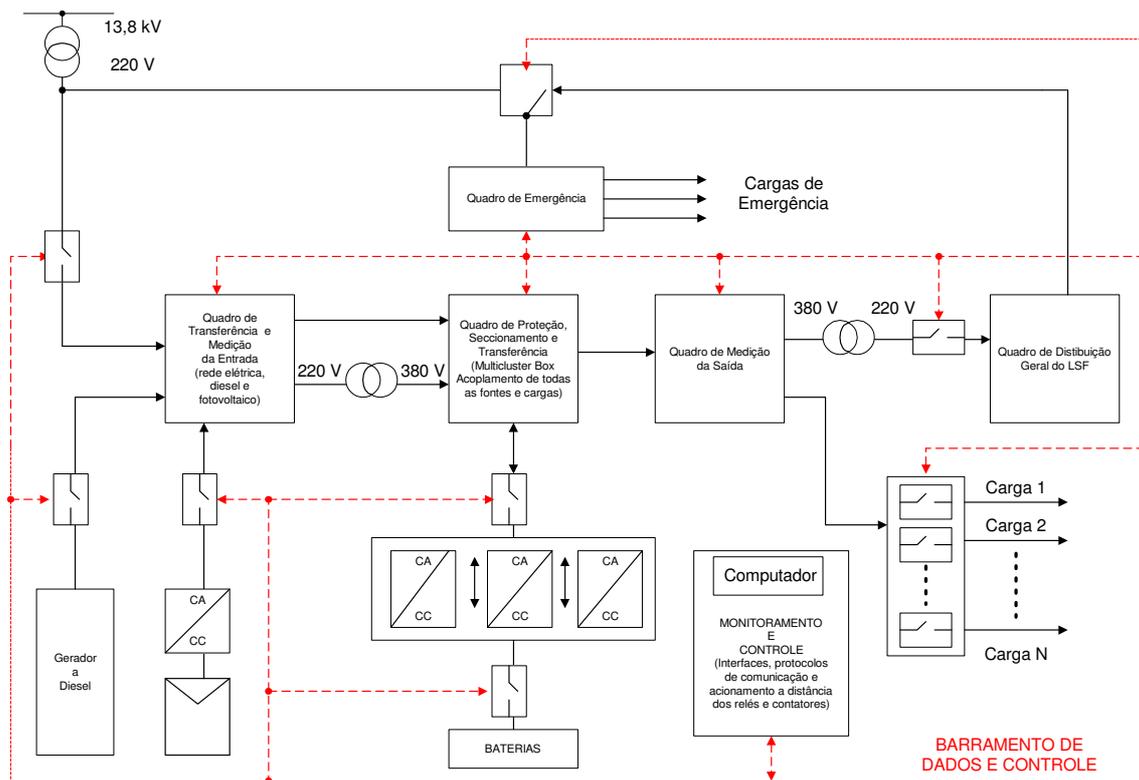


Figura 3 – Minirrede com acoplamento c.a. do LSF/IEE-USP

Pretende-se utilizar a minirrede fotovoltaica–bateria–diesel–rede elétrica montada no LSF/IEE-USP para avaliar, entre outras questões: as eficiências de todos os componentes do sistema híbrido, o funcionamento de diversos equipamentos de uso final, o comportamento de cargas não lineares, as diferentes estratégias de operação e gestão da minirrede, o consumo de óleo diesel e o funcionamento em paralelo com a rede elétrica.

Através do sistema de controle e monitoramento instalado na minirrede, que pode gerar diversos perfis de carga e realizar a medição de diversas variáveis (corrente, tensão, potência, frequência, irradiância, temperatura, etc), pode-se estudar em detalhe o funcionamento de sistemas híbridos bem como realizar as devidas comparações com os Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica com Fontes Intermitentes (SIGFI).

Como premissas do trabalho, os critérios para decisão de atendimento de comunidades isoladas utilizando minirrede com acoplamento c.a. ou SIGFI devem considerar tanto o fornecimento de energia elétrica para lâmpadas, televisão, rádio, ventilador e outros aparelhos de baixa potência e/ou uso esporádico, como também outras demandas, como por exemplo: água potável, refrigeração, gelo, etc.

Ou seja, além do tamanho do sistema de geração (Wp), da capacidade de armazenamento do banco de baterias (kWh), do valor do sistema de condicionamento de potência (W) e dos custos operacionais envolvidos, a escolha entre minirrede e SIGFI deve considerar todos os usos finais de energia elétrica, existentes ou desejados, inclusive aqueles com possibilidade de agregar à geração de energia processos produtivos para a comunidade atendida por uma minirrede. Por exemplo, se em uma determinada comunidade há a necessidade de um sistema de bombeamento de água ou uma máquina para produção de gelo ou ainda refrigeradores, então o planejamento do processo de eletrificação desta comunidade deve considerar a existência dos equipamentos de uso final necessários para a realização dos serviços requeridos, como por exemplo: motores de indução trifásicos, compressores para geladeiras ou *freezers*, etc.

Para melhor compreensão da problemática, pretende-se realizar diversas comparações entre minirredes e SIGFIs. Para isso, serão utilizados os SIGFIs instalados nas dependências do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do IEE/USP

bem como os instalados em projetos piloto coordenados pelo LSF. Além disso, pretende-se utilizar os dados (consumo, perfil de carga, usos finais de energia, etc.) referentes ao projeto piloto de implantação de 23 SIGFIs no estado do Amazonas, realizado pelo LSF no ano de 2005.

Para alcançar os objetivos previstos no projeto, um sistema híbrido fotovoltaico – bateria – diesel – rede elétrica foi instalado no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (LSF/IEE-USP). Tal sistema é composto por três geradores fotovoltaicos de 1 kWp, três inversores de conexão à rede de 1,1 kW, três inversores bidirecionais de 5 kW para formação da rede, um banco de baterias OPzS de 24 kWh, dois transformadores 220/380 de 30 kVA, diversas cargas controláveis e um conjunto de *hardware* comandado por *software* para realizar o monitoramento e o controle da minirrede. As fotos das Fig. 4, 5 e 6 mostram os componentes da minirrede já instalados no espaço físico do LSF/IEE-USP.



Figura 4 – Inversores bidirecionais, quadros de seccionamento, medição e proteção da minirrede do LSF/IEE-USP.



Figura 5 – Gerador fotovoltaico do sistema híbrido do LSF/IEE-USP.

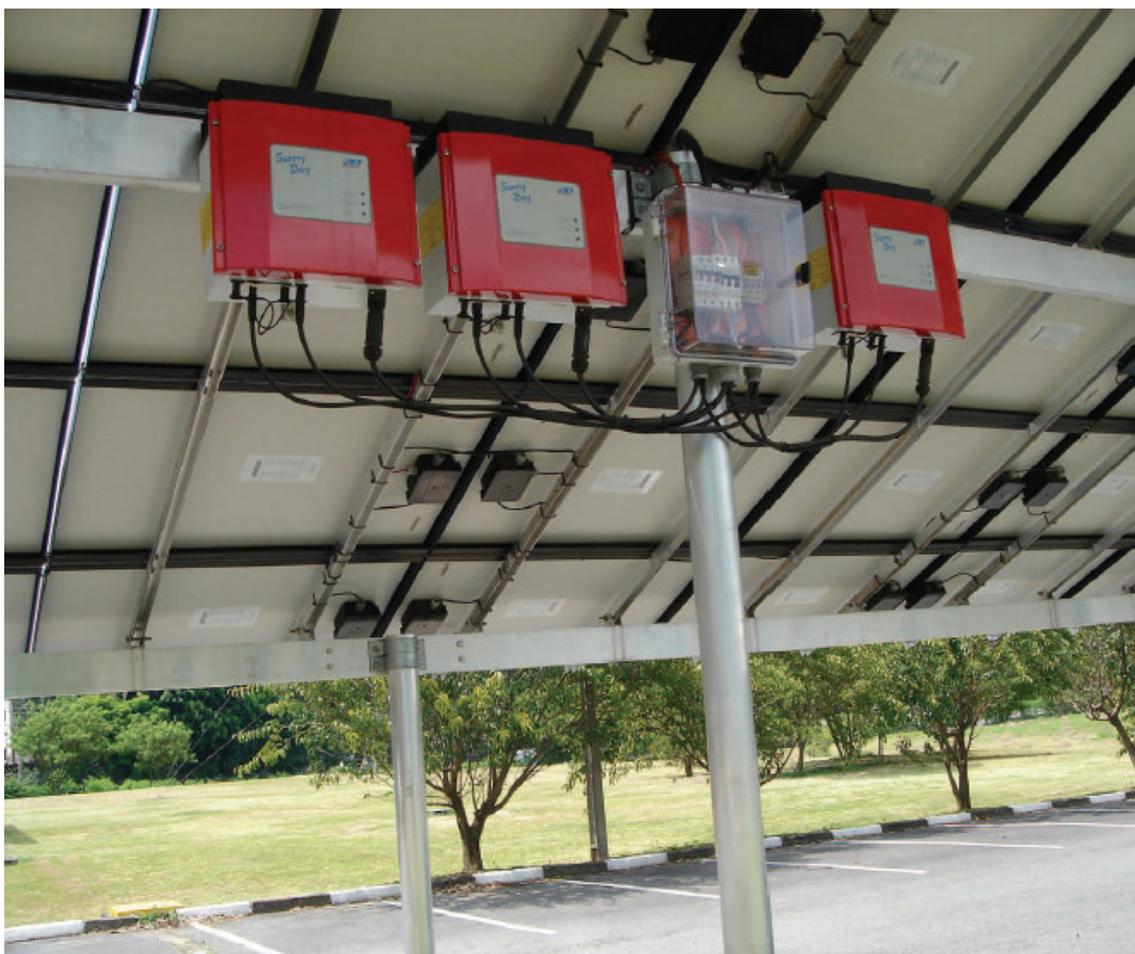


Figura 6 – Inversores c.c./c.a. de conexão à rede que compõem o sistema híbrido do LSF/IEE-USP.

Para realizar a operação da unidade de capacitação do LSF/IEE-USP, um sistema de monitoramento e controle da minirrede híbrida fotovoltaica-bateria-diesel-rede elétrica foi montado. Através desse sistema de supervisão, que permite avaliar diversas variáveis em diferentes configurações de interesse, pode-se estudar em detalhes o fluxo de potência entre os componentes da minirrede, bem como as estratégias de controle utilizadas pelos componentes (inversores bidirecionais, inversores de conexão à rede e gerador a diesel) para manter a estabilidade do sistema híbrido.

O monitoramento e controle da minirrede são realizados por um computador conectado a um sistema de aquisição de dados e a um sistema de comando de contadores. Nesse computador, o operador poderá visualizar o valor de cada uma das variáveis medidas e atuar no sistema através dos contadores.

O sistema de supervisão proposto permite o monitoramento em tempo real de várias variáveis (tensão, corrente, potência, frequência, temperatura e irradiância), realiza o gerenciamento de carga e de despacho, armazena as variáveis de interesse e emite relatórios do sistema híbrido (histórico, falhas, alertas, etc).

O sistema de monitoramento descrito oferece uma plataforma que permite avaliar valores instantâneos e valores diários em arquivos diferenciados, permitindo assim uma melhor organização das informações. A plataforma a ser utilizada para controle e monitoramento da minirrede do LSF/IEE-USP será desenvolvida em ambiente gráfico *LabView*. Esta plataforma foi escolhida devido à grande versatilidade para trabalhar com diversos protocolos de comunicação e para realizar interface com vários tipos de *hardware*.

Convém mencionar que a implementação de uma ferramenta de supervisão na minirrede do LSF/IEE-USP pode contribuir para a disseminação de projetos de eletrificação rural, pois a maioria dos sistemas híbridos está instalada em locais remotos, de difícil acesso e, principalmente, com falta de mão-de-obra qualificada para operá-los. Esse fato justifica a importância da implementação de ferramentas automáticas que permitam a monitoração e o controle da operação do sistema, assegurando assim a redução dos custos operacionais e a sua confiabilidade. O sistema de monitoramento e controle, seja ele local ou remoto, deve possuir as seguintes características (Pinho *et al.*, 2008):

- Possibilidade de medições de grandezas elétricas c.c. e c.a. do sistema (tensão, corrente, e frequência de operação – lado c.a.) e de outras grandezas, como por exemplo, temperatura dos módulos e/ou das baterias (a temperatura está relacionada com a eficiência desses dispositivos), velocidade e direção do vento, umidade relativa do ar, irradiância, consumo de óleo diesel, entre outras;
- Regulação do ciclo de carga e descarga das baterias, a fim de aumentar sua vida útil;
- Capacidade de armazenar as informações obtidas pela monitoração;

- Definição de um sistema de proteção (chaves, disjuntores, relés) e alerta (luminoso e/ou sonoro), de modo a prevenir e identificar condições de contingências;
- Monitoração em tempo real das condições operacionais, bem como a previsão das mesmas através das informações coletadas;
- Capacidade de transmitir sinais de monitoração e comando via protocolo de comunicação.

Ressalta-se que a minirrede do LSF/IEE-USP poderá funcionar em dois modos distintos, quais sejam: operação em sistema isolado ou operação conectado à rede elétrica. Dessa forma, além de contribuir para o estudo de sistemas híbridos usados para eletrificação de comunidades isoladas, a infraestrutura montada poderá ser utilizada para investigar o comportamento de sistemas híbridos operando em paralelo com a rede elétrica convencional.

Convém mencionar que os métodos utilizados para instalação e gestão da minirrede no LSF/IEE-USP estão inseridos dentro de um conjunto de procedimentos técnicos em observância às normas NBR 5410 e NR 10. Além disso, a concepção, o projeto e a instalação da minirrede consideraram os dispostos nas normas IEC 62257.

Finalmente, para consolidar a metodologia adotada, o trabalho se propõe a criar um sistema flexível e robusto, com qualidade compatível ao estado da arte em monitoramento e controle de sistemas híbridos, como, por exemplo, as minirredes montadas no âmbito do projeto *Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids*, financiado pela Comunidade Europeia (Osika, 2005).

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo descreveu a unidade de capacitação e difusão de minirredes instalada no LSF/IEE-USP. Dentre as principais funcionalidades da unidade de capacitação, tem-se a possibilidade de caracterizar o funcionamento de sistemas em minirrede compostos por elementos acoplados diretamente nos barramentos c.c., c.a. ou misto; avaliar diferentes condições de operação e identificar as vantagens e desvantagens da utilização de cada configuração de sistemas híbridos. Além disso, utilizando-se dos SIGFIs existentes no LSF, pretende-se identificar as vantagens e desvantagens da utilização de ambas as configurações, Sistemas Individuais de Geração com Fontes Intermitentes ou Sistemas em Minirredes de Geração com Fontes Intermitentes com *back-up* diesel.

Em relação à formação de recursos humanos especializados na tecnologia fotovoltaica, nota-se, no Brasil, uma grande carência de profissionais qualificados e, também, de instituições que ofereçam cursos de capacitação de mão-de-obra. No sentido de contribuir à formação de pessoal, espera-se que a unidade de capacitação apresentada seja utilizada para realizar cursos e treinamentos, tendo como público alvo engenheiros, técnicos, professores e estudantes.

Finalmente, espera-se que a infraestrutura laboratorial existente possa contribuir para o desenvolvimento de procedimentos de operação, monitoramento e gestão de minirredes no país.

#### Agradecimentos

Merece mencionar que o projeto conta com apoio financeiro da Agencia Nacional do Petróleo, Programa PRH-4, IEE/USP e do Conselho Nacional de Ciência e Tecnologia, CNPq, através do Edital MCT/CNPq 14/2010 – Universal, Processo 478400/2010-1.

#### REFERÊNCIAS

- IEC 62257-9-2. Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Microgrids, Switzerland, 2006.
- IEC 62257-5. Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Part 5: Protection against electrical hazards, Switzerland, 2005.
- Mocelin, A. R. Implantação e Gestão de Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares: Resultados Operacionais de um Projeto Piloto de Aplicação da Resolução da ANEEL N°83/2004 (Dissertação de Mestrado). São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Eletrotécnica e Energia, 2007.
- Morante, F., Mocelin, A. R., Zilles, R. Capacitación y Transferencia Tecnológica: su Importancia en la Sostenibilidad de los Proyectos Basados en la Tecnología Solar Fotovoltaica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 10, p. 12.01-12.08, 2006.
- Osika, O. Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids – Work Package H: Impact on the Development of Electricity Infrastructures (expansion Planning) – Description of the laboratory micro grids. European Commission, 2005.
- Pinho, J. T. Sistemas híbridos – soluções energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.
- Zilles, R., Mocelin, A. R., Morante, F. Programa Brasileiro de Formação e Certificação de Instaladores de Sistemas Fotovoltaicos de Pequeno e Médio Porte. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 13, p. 10-09-10-16, 2009.

## **UNIT TO CAPACITATION AND DIFFUSION IN PHOTOVOLTAIC-BATTERY-DIESEL-ELECTRICAL NETWORK MICROGRID**

**Abstract.** *This document describes the microgrid training and dissemination unit installed in the Laboratory of Photovoltaic Systems of the Institute of Electrotechnical and Energy of the University of São Paulo (LSF/IEE-USP). The installed microgrid is powered by a hybrid system composed of photovoltaic modules, lead-acid batteries, diesel electric generator and conventional grid. The implementation of this project occurs in the context of the consolidation of a Brazilian Program of Training and Certification of Installers of Small and Medium Photovoltaic Systems, of which the LSF/IEE-USP is one of the supporters. The installation of this hybrid system is the result of a project funded by the National Oil Agency (ANP) and the National Council of Science and Technology (CNPq).*

**Key words:** Hybrid Systems, Rural Electrification