

PROJETO “DESENVOLVIMENTO DE COMPETÊNCIAS E AVALIAÇÃO DE ARRANJOS TÉCNICOS E COMERCIAIS EM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA COM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE”

Marcelo Pinho Almeida – marcelopa@iee.usp.br

Roberto Zilles – zilles@iee.usp.br

Universidade de São Paulo - Instituto de Energia e Ambiente – Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos

Carlos Ribeiro – caribeiro@ctEEP.com.br

Companhia de Transmissão Paulista

Amilton Deorio – amilton.deorio@cesp.com.br

Companhia Energética do Estado de São Paulo

Resumo. Este trabalho apresenta o projeto PD-0068-0029/2011, elaborado e executado no âmbito da Chamada Pública da ANEEL, P&D - 013/2011 – PROJETO ESTRATÉGICO: “Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira”. O projeto foi concebido em parceria com a Companhia de Transmissão Paulista, CTEEP, e a Companhia Energética do Estado de São Paulo, CESP, e executado pelo Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, IEE/USP. O objetivo central é a instalação, a operação e o monitoramento de uma usina fotovoltaica de 0,540 MWp, conectada indiretamente por meio de unidades consumidoras à rede de distribuição de energia elétrica, constituída por 4 subsistemas com diferentes tipologias e configurações de inversores incorporando os seguintes conceitos e estudos: *Building Integrated (BIPV)*, *Building Applied (BAPV)*, central solar sobre o terreno (CTPV) e correção do fator de potência (CRPV).

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico, Conexão à rede, Geração distribuída

1. INTRODUÇÃO

Em maio de 2012, com recursos da CTEEP e da CESP, o Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, IEE/USP, com o apoio da Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo, FUSP, e da Prefeitura da Universidade de São Paulo, PUSP, iniciou as atividades para a implantação da usina fotovoltaica com capacidade para atender 1% do consumo de energia elétrica da Cidade Universitária da USP. As atividades de pesquisa já realizadas e as em andamento fazem parte da Chamada Pública da ANEEL, P&D - 013/2011 – PROJETO ESTRATÉGICO: “Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira”.

O objetivo principal do projeto é a instalação, operação e monitoramento de uma usina solar fotovoltaica de 0,540 MWp, conectada indiretamente por meio de unidades consumidoras à rede de distribuição de energia elétrica, constituída por quatro subsistemas com diferentes tipologias e configurações de inversores incorporando os seguintes conceitos e estudos: *Building Integrated (BIPV)*, *Building Applied (BAPV)*, central solar sobre o terreno (CTPV) e correção do fator de potência (CRPV).

As configurações dos subsistemas foram concebidas com base no objetivo principal da chamada P&D - 013/2011: propor arranjos técnicos e comerciais de geração de energia elétrica, de forma integrada e sustentável, buscando criar condições para o desenvolvimento de base tecnológica e infraestrutura técnica e tecnológica para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética nacional. Dessa forma, as quatro possibilidades de topologias e configurações que estão sendo avaliadas técnica e financeiramente desde a fase de projeto e instalação até a fase de operação são:

- ✓ Subsistema BIPV: 150 kWp integrados em cobertura de vagas de estacionamento com 24 inversores;
- ✓ Subsistema BAPV: 156 kWp aplicados em cobertura de edificação com 10 inversores;
- ✓ Subsistema CTPV: 156 kWp sobre o terreno com inversor central de fabricação nacional (WEG);
- ✓ Subsistema CRPV: 78 kWp aplicados em cobertura de edificação com 5 inversores e controle de potência reativa.

Complementando o objetivo principal, o projeto possui ainda objetivos secundários ligados à pesquisa e à capacitação:

- ✓ Estudo da gestão ativa da demanda;
- ✓ Estudo sobre flutuações de potência e qualidade do serviço elétrico;
- ✓ Avaliação do sistema com compensação de reativos;
- ✓ Desenvolvimento de currículos e unidade física para Treinamento e Capacitação;

- ✓ Intercâmbio com especialistas do Instituto de Energia Solar da Universidade Politécnica de Madrid, IES/UPM.
- ✓ Desenvolvimento de procedimento de ensaio para certificação de uma unidade de GD fotovoltaica;
- ✓ Laboratório para qualificação de inversores.

2. DESCRIÇÃO DA USINA

A usina fotovoltaica de 0,540 MWp está conectada à rede de distribuição interna da USP que está conectada, por meio de uma subestação, a rede da AES ELETROPAULO, porém não há exportação de energia devido à demanda elevada da própria universidade. A Fig. 1 mostra a localização dos quatro subsistemas nas instalações da USP.

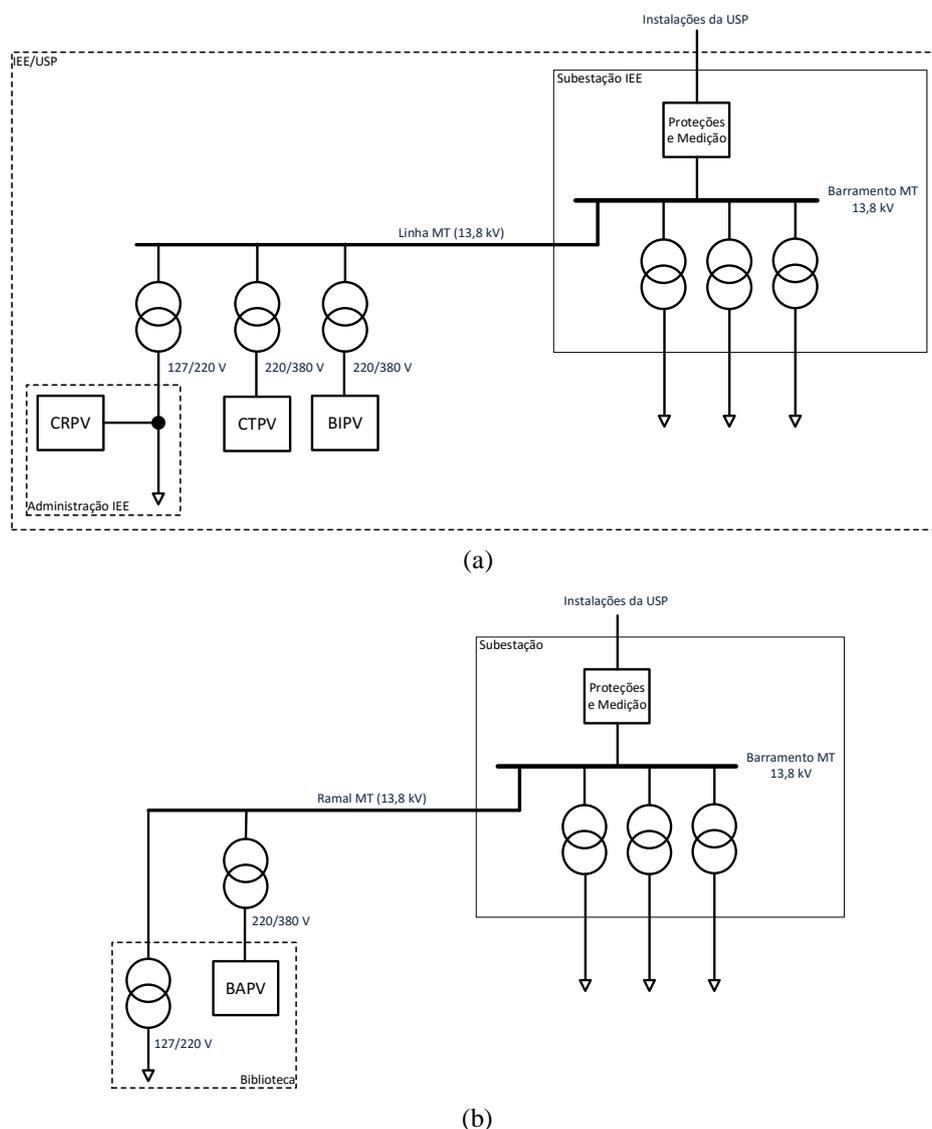


Figura 1 – Localização dos quatro subsistemas que compõem a usina de 0,540 MWp nas instalações elétricas da USP.

Os subsistemas BIPV, CTPV e CRPV estão localizados no IEE/USP e a conexão com a rede é em uma linha de MT que conecta estes três subsistemas a uma das subestações que atendem o instituto. Os subsistemas BIPV e CTPV possuem transformador elevador e estão conectados diretamente à linha de MT, enquanto que o subsistema CRPV está conectado ao quadro de distribuição do prédio da administração do IEE/USP (em BT) que, por sua vez, está conectado à linha de MT por um transformador elevador dedicado (Fig. 1a).

O subsistema BAPV, que também possui transformador elevador, está localizado na Biblioteca Brasileira Guita e José Mindlin da Universidade de São Paulo, BB/USP, porém a conexão à rede é no ramal de MT que alimenta a biblioteca (Fig. 1b).

Todos os subsistemas são monitorados por um sistema supervisor do tipo SCADA, sendo possível observar em tempo real e gravar com período de integralização de 10 minutos grandezas elétricas, como tensão e corrente de todas as séries fotovoltaicas, potência c.c. e c.a. dos inversores individuais, potência c.a. total gerada em BT e MT e fator de potência nos barramentos em BT e MT, e grandezas ambientais, como temperatura ambiente e irradiância.

A continuação é apresentada a descrição detalhada dos quatro subsistemas.

2.1 Subsistema BIPV (150 kWp)

O subsistema BIPV é composto por 24 inversores de 5 kW nominais, trifásicos (220/380 V) e sem transformador da fabricante SMA, modelo Sunny Tripower 5000TL-20. Cada inversor está associado a uma única série fotovoltaica formada por 24 módulos de 260 Wp da fabricante Yingli, modelo YL260C-30b. As saídas em c.a. dos 24 inversores são encaminhadas a um quadro de BT localizado dentro de um eletrocentro, onde também estão acondicionados o transformador elevador e os dispositivos de proteção elétrica. No lado em c.c. as proteções elétricas (fusíveis, DPS e chaves interruptoras) e os instrumentos de medição (corrente, tensão e variáveis ambientais) estão instalados em caixas de conexão próximas aos inversores. A Fig. 2 apresenta o diagrama unifilar deste subsistema.

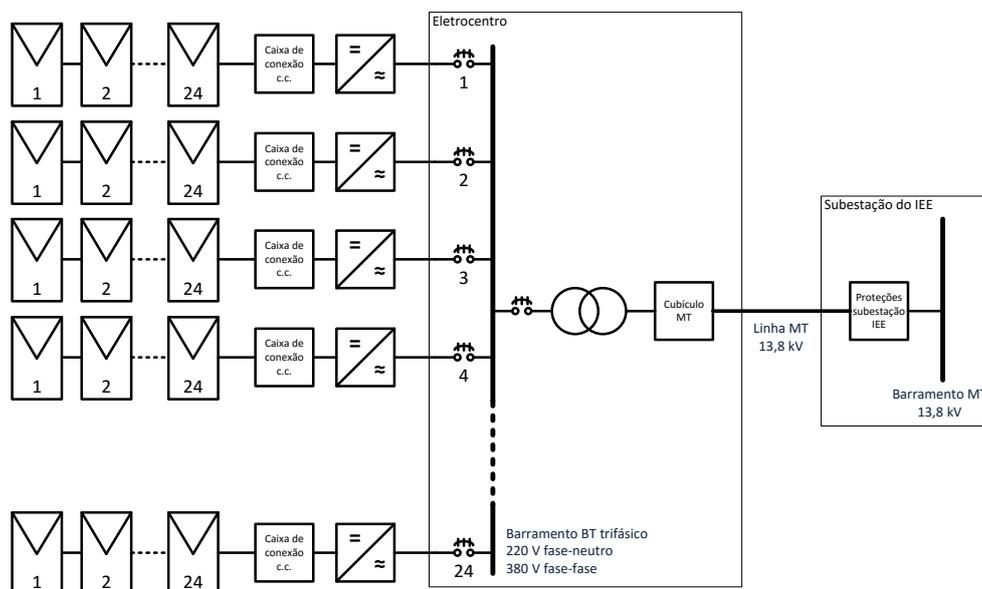


Figura 2 – Diagrama unifilar do subsistema BIPV.

A estrutura de suporte e os módulos fotovoltaicos formam uma cobertura de estacionamento como mostra a Fig. 3. A estrutura é dividida em duas partes e cada uma possui três inclinações distintas: 10°, 20° e 30° em relação à horizontal, e em cada inclinação há duas fileiras de 51 módulos. As caixas de conexão c.c. e os inversores estão instalados na própria estrutura de suporte, abaixo dos módulos, com uma altura mínima em relação ao solo de 2 m. Todo o cabeamento (c.c., c.a. e comunicação) é encaminhado em eletrodutos também fixados à estrutura.



Figura 3 – Estruturas de suporte com módulos formando a cobertura do estacionamento do subsistema BIPV.

2.2 Subsistema CTPV (156 kWp)

O subsistema CTPV possui um único inversor central de 140 kW nominais, trifásico (127/220 V) e sem transformador de fabricação nacional da WEG, modelo SIW 700. Ao inversor estão conectadas 30 séries fotovoltaicas compostas por 20 módulos de 260 Wp da fabricante Yingli, modelo YL260C-30b. O inversor está localizado dentro de um eletrocentro, onde também há um transformador elevador e os dispositivos de proteção elétrica. As proteções elétricas (fusíveis, DPS e chaves interruptoras) e os instrumentos de medição (corrente, tensão e variáveis ambientais) do gerador fotovoltaico estão instalados em caixas de conexão onde também é feita a ligação em paralelo de três séries fotovoltaicas, de maneira que apenas 10 pares positivo e negativo são encaminhados por eletrodutos subterrâneos ao inversor central. O diagrama unifilar deste subsistema é apresentado na Fig. 4.

Cada grupo de três séries fotovoltaicas de 20 módulos está instalado em uma estrutura de suporte metálica fixa (inclinação de 23° em relação à horizontal e azimute de aproximadamente 18° Oeste em relação ao Norte geográfico) presa ao solo. A Fig. 5 mostra uma visão lateral das estruturas de suporte com os módulos, além de uma visão externa do eletrocentro.

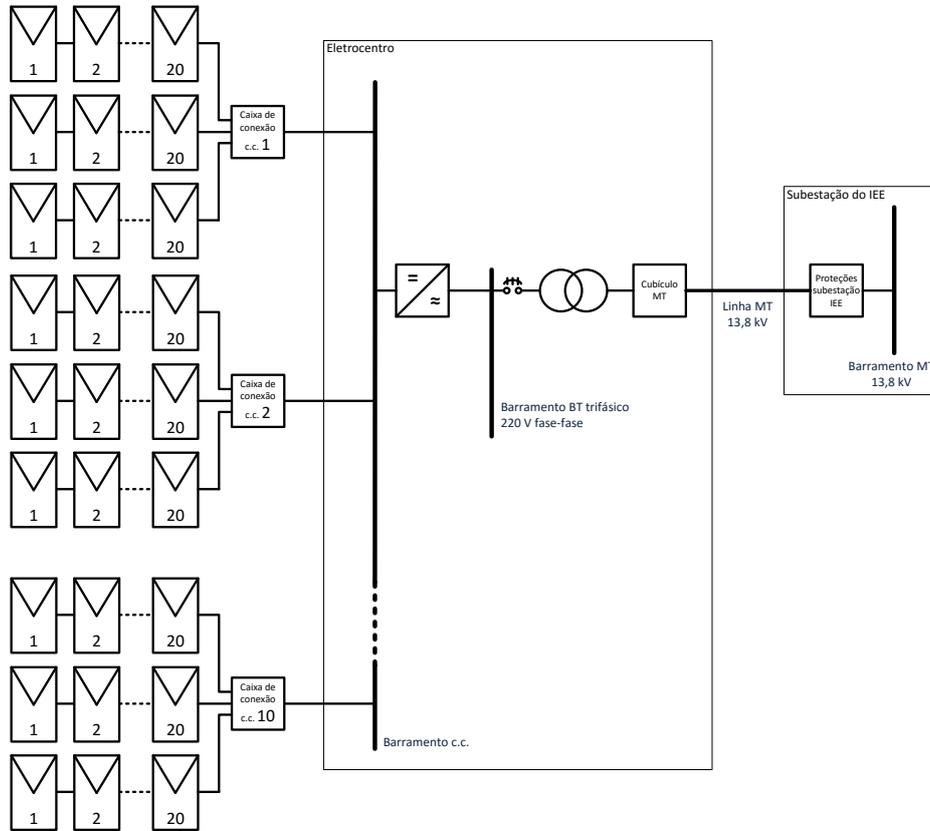


Figura 4 – Diagrama unifilar do subsistema CTPV.



Figura 5 – Gerador fotovoltaico (esquerda) e eletrocentro (direita) do subsistema CTPV.

2.3 Subsistema CRPV (78 kWp)

O subsistema CRPV é composto por 5 inversores de 12,5 kW nominais, trifásicos (220/380 V) e sem transformador da fabricante POWER-ONE (ABB), modelo AURORA TRIO PVI12.5-TL-OUTDS. Cada inversor está conectado a três séries fotovoltaicas compostas por 20 módulos de 260 Wp da fabricante Solarworld, modelo SW 260 mono. As saídas em c.a. dos 5 inversores são encaminhadas a um quadro de BT do subsistema, e o barramento deste quadro é conectado ao barramento do quadro de distribuição do prédio da administração do IEE/USP via transformador redutor, de maneira a adequar a tensão nominal dos inversores (220/380 V) à tensão de atendimento do prédio (127/220 V). No lado em c.c. as proteções elétricas (fusíveis, DPS e chaves interruptoras) e os instrumentos de medição (corrente, tensão e variáveis ambientais) estão instalados em caixas de conexão próximas aos inversores. A Fig. 6 apresenta o diagrama unifilar do subsistema CRPV, que simula um sistema de minigeração distribuída onde é possível controlar a injeção/demanda de reativos e regular o fator de potência da unidade consumidora ou a tensão no ponto de conexão.

Há cinco estruturas fixas de suporte de módulos (inclinação de 23° em relação à horizontal e azimute de aproximadamente 18° Oeste em relação ao Norte geográfico) instaladas diretamente nas telhas de fibrocimento do

prédio da administração do IEE/USP. Cada estrutura possui um arranjo de 60 módulos associados a um mesmo inversor, que, por sua vez, está instalado na própria estrutura abaixo dos módulos junto a sua caixa de conexão correspondente. A Fig. 7 mostra as estruturas de suporte dos módulos e dos inversores / caixas de conexão.

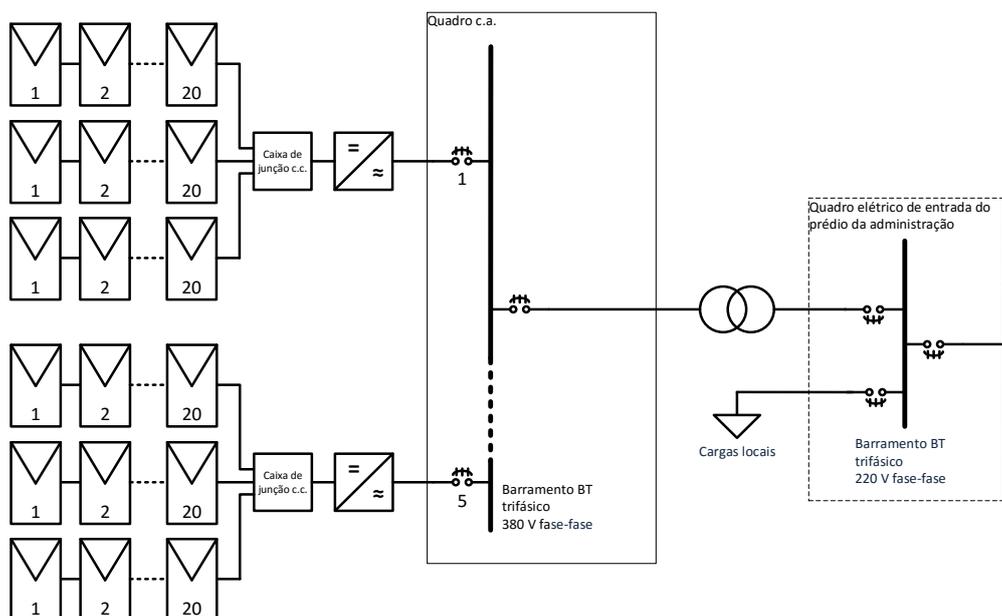


Figura 6 – Diagrama unifilar do subsistema CRPV



Figura 7 – Estruturas de suporte dos módulos e inversores / caixas de conexão do subsistema CRPV.

2.4 Subsistema BAPV (156 kWp)

O subsistema BAPV possui 10 inversores de 15 kW nominais, trifásicos (220/380 V) e sem transformador da fabricante SMA, modelo Sunny Tripower 15000TL-10. Cada inversor está conectado a três séries fotovoltaicas compostas por 20 módulos de 260 Wp da fabricante Yingli, modelo YL260C-30b. As saídas em c.a. dos 10 inversores são encaminhadas a um quadro de BT localizado dentro de um eletrocentro, onde também estão localizados um transformador elevador e os dispositivos de proteção elétrica. No lado em c.c. as proteções elétricas (fusíveis, DPS e chaves interruptoras) e os instrumentos de medição (corrente, tensão e variáveis ambientais) estão instalados em caixas de conexão próximas aos inversores, onde também é feita a conexão em paralelo das três séries fotovoltaicas que alimentam um mesmo inversor. A Fig. 8 apresenta o diagrama unifilar do subsistema BAPV.

Há cinco estruturas de suporte de módulos fixas (inclinação de 23° em relação à horizontal e azimute de aproximadamente 27° Leste em relação ao Norte geográfico) instaladas nas próprias telhas metálicas da BB/USP, e cada uma possui um arranjo de 60 módulos associados a um mesmo inversor. Os inversores, bem como suas caixas de conexão correspondentes, estão instalados abaixo do telhado em um forro técnico em uma estrutura de suporte metálica. A Fig. 9 mostra as estruturas de suporte dos módulos e dos inversores / caixas de conexão.

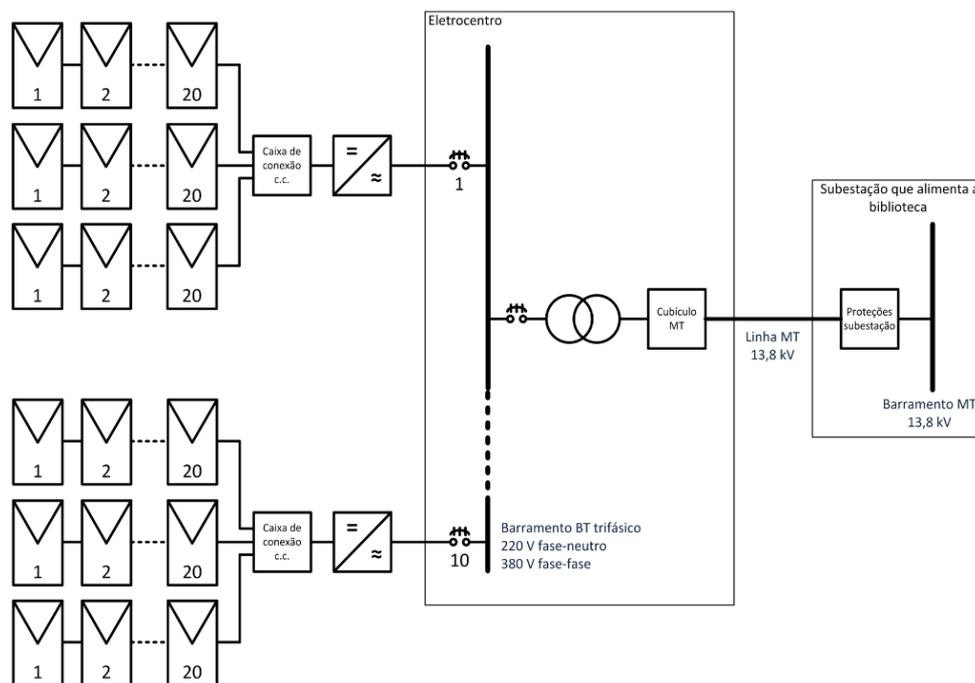


Figura 8 – Diagrama unifilar do subsistema BAPV.



Figura 9 – Estruturas de suporte dos módulos (esquerda) e dos inversores / caixas de conexão (direita) do subsistema BAPV.

3. ATIVIDADES DE DIFUSÃO E DE CAPACITAÇÃO

Atividades de difusão do conhecimento e de capacitação foram realizadas na forma de seminários, cursos de capacitação e workshops. Além de fazerem parte dos objetivos do projeto, estas atividades são de fundamental importância para socializar o aprendizado, e não apenas o conteúdo técnico, como também as dificuldades existentes no mercado nacional, e discutir soluções para os entraves e propostas para desenvolvimentos futuros que atendam às demandas reais do setor.

A seguir são enumeradas as atividades de difusão e capacitação realizadas até o final do ano de 2015:

- ✓ Seminário de socialização de atividades realizadas no âmbito do P&D13-ANEEL e a inserção das fontes intermitentes na matriz elétrica, TRACTBEL, NEONERGIA, CTEEP/CESP e ONS, realizado no IEE/USP em abril 2013;
- ✓ Seminário sobre Micro e Minigeração Distribuída para Representantes de Prefeituras da Região Metropolitana de São Paulo, realizado no IEE/USP em outubro de 2013;
- ✓ Capacitação em Energia Fotovoltaica, realizada na ANEEL em novembro de 2013;
- ✓ Capacitação de Professores do Centro Educacional Paula Souza, realizada no IEE/USP em duas partes, uma em setembro de 2014 e outra em fevereiro de 2015;

- ✓ Workshop “A qualificação profissional e formação de mão de obra para atendimento da demanda de instalações de geração distribuída com sistemas fotovoltaicos, realizado no IEE/USP em setembro de 2015;
- ✓ Workshop “Inversores Híbridos com Sistemas de Armazenamento de Energia”, realizado no IEE/USP em novembro de 2015.

4. PRODUÇÃO CIENTÍFICA/ACADÊMICA

Os estudos realizados durante a execução dos objetivos do projeto resultaram em diversos trabalhos acadêmicos/científicos. Os principais trabalhos finalizados até o final de 2015, bem como suas contribuições ao setor fotovoltaico no país, estão enumerados a seguir:

- ✓ Excedente de Reativos em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (Pinto e Zilles, 2012);
- ✓ Reactive Power Excess Charging in Grid-connected PV Systems in Brazil (Pinto e Zilles, 2014);
- ✓ Extreme Overirradiance Events in São Paulo, Brazil (Almeida *et al.*, 2014);
- ✓ PV Power Forecast Using a Nonparametric PV Model (Almeida *et al.*, 2015);
- ✓ Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (Almeida, 2012). Contribuiu para a elaboração da norma ABNT NBR 16274;
- ✓ Qualificação e Etiquetagem de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (Pinto, 2012). Contribuiu para a elaboração das normas ABNT NBR 16149, ABNT NBR 16150 e ABNT NBR/IEC 62116;
- ✓ Avaliação de Modelos de Negócio para Energia Solar Fotovoltaica no Mercado de Distribuição Brasileiro (Barros, 2014);
- ✓ Difusão de Sistemas Fotovoltaicos Residenciais Conectados à Rede no Brasil: uma Simulação via Modelo de Bass (Konzen, 2014). Contribuiu para a elaboração da Nota Técnica “DEA 19/14 – Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos” da EPE;
- ✓ Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Condições Atuais e Perspectivas Futuras (Nakabayashi, 2015). Contribuiu para a elaboração da Nota Técnica “Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Viabilidade Econômica” da ABINEE;
- ✓ Qualificação Profissional e Capacitação Laboratorial em Sistemas Fotovoltaicos (Mocelin, 2014). Contribuiu para o projeto da Unidade de Treinamento e Capacitação, localizada no IEE/USP;
- ✓ Análise de um Mecanismo de Compensação de Reativos Incorporado aos Inversores de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica (Benedito, 2014);

Além dos trabalhos enumerados acima, outros ainda estão em andamento:

- ✓ Avaliação do Impacto de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede de Distribuição de Baixa Tensão – tese de doutorado;
- ✓ Estudo das Implicações Técnicas da Inserção em Grande Escala da Geração Solar Fotovoltaica no Sistema Elétrico Brasileiro – tese de doutorado;
- ✓ Estudo da Degradação de Geradores Fotovoltaicos de Diferentes Tecnologias e sua Influência na Estimativa Energética de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede – tese de doutorado.

5. COMENTÁRIOS SOBRE A EXECUÇÃO E ANDAMENTO DO PROJETO

Os sistemas CTPV e CRPV entraram em operação em janeiro de 2014 e os sistemas BIPV e BAPV entraram em operação, respectivamente, em julho e setembro de 2014. Entre janeiro de 2014 e abril de 2015 várias atividades de pesquisa, treinamento e avaliação foram desenvolvidas. O monitoramento de no mínimo 12 meses, previsto no P&D - 013/2011, teve início em maio de 2015. Até o momento o sistema opera satisfatoriamente e devido sua localização e configurações recebe periodicamente visitas de empresas do setor e de escolas técnicas. Os resultados obtidos, registrados em publicações de artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado, e a infraestrutura desenvolvida e instalada, usina de geração fotovoltaica, unidade de capacitação e laboratório para qualificação de inversores c.c./c.a., estão diretamente associados com os objetivos do P&D - 013/2011 – PROJETO ESTRATÉGICO: “Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração solar fotovoltaica na matriz energética brasileira” e contribuem para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no país.

REFERÊNCIAS

- Pinto, A., Zilles, R., 2012. Excedente de Reativos em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES, São Paulo.
- Pinto, A., Zilles, R., 2014. Reactive power excess charging in grid-connected PV systems in Brazil, *Renewable Energy*, vol. 62, pp. 47-52.
- Almeida, M. P., Zilles, R., Lorenzo, E., 2014. Extreme Overirradiance Events in São Paulo, Brazil, *Solar Energy*, vol. 110, pp. 168–173.
- Almeida, M. P., Perpiñán, O., Narvarte, L., 2015. PV Power Forecast Using a Nonparametric PV Model, *Solar Energy*, vol. 115, pp. 354–368.
- Almeida, M. P., 2012. Qualificação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Dissertação de Mestrado, PPGE, USP, São Paulo.
- Pinto, A., 2012. Qualificação e Etiquetagem de Inversores para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, Dissertação de Mestrado, PPGE, USP, São Paulo.
- Barros, L. V., 2014. Avaliação de Modelos de Negócio para Energia Solar Fotovoltaica no Mercado de Distribuição Brasileiro, Dissertação de Mestrado, PPGE, USP, São Paulo.
- Konzen, G., 2014. Difusão de Sistemas Fotovoltaicos Residenciais Conectados à Rede no Brasil: uma Simulação via Modelo de Bass, Dissertação de Mestrado, PPGE, USP, São Paulo.
- Nakabayashi, R. K., 2014. Microgeração Fotovoltaica no Brasil: Condições Atuais e Perspectivas Futuras, Dissertação de Mestrado, PPGE, USP, São Paulo.
- Mocelin, A. R., 2014. Qualificação Profissional e Capacitação Laboratorial em Sistemas Fotovoltaicos, Tese de Doutorado, PPGE, USP, São Paulo.
- Benedito, R. S., 2014. Análise de um Mecanismo de Compensação de Reativos Incorporado aos Inversores de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica, Tese de Doutorado, PPGE, USP, São Paulo.

SKILLS DEVELOPMENT AND EVALUATION OF TECHNICAL AND COMMERCIAL ARRANGEMENTS IN DISTRIBUTED GENERATION WITH GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract. *This paper presents the project PD-0068-0029 / 2011, prepared and implemented under Public Call of ANEEL, R&D - 013/2011 - STRATEGIC PROJECT: "Technical and commercial arrangements for insertion of solar photovoltaic generation in the Brazilian electric matrix". The project was conceived in partnership with the Companhia de Transmissão Paulista, CTEEP, and the Companhia Energética do Estado de São Paulo, CESP, and it was executed by the Institute of Energy and Environment at the University of São Paulo, IEE/USP. The main objective is the installation, operation and monitoring of a photovoltaic plant of 0.540 MWp, connected indirectly through consumer units to the electricity distribution network, composed of four subsystems with different types and configurations of inverters and incorporating the following concepts and studies: Building Integrated (BIPV), Building Applied (BAPV) ground solar plant (CTPV) and power factor correction (CRPV).*

Key words: *Photovoltaic system, Grid-connected, Distributed Generation*