UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

ANDRÉ RICARDO MOCELIN

QUALIFICAÇÃO PROFISSIONAL E CAPACITAÇÃO
LABORATORIAL EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

São Paulo
2014

ANDRÉ RICARDO MOCELIN

QUALIFICAÇÃO PROFISSIONAL E CAPACITAÇÃO LABORATORIAL EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências no Programa de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Zilles

Versão Corrigida

(Versão original disponível na Biblioteca da Unidade que aloja o Programa e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

São Paulo
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Mocelin, André Ricardo.

Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos./ André Ricardo Mocelin; orientador: Roberto Zilles. – São Paulo, 2014.

299 f.: il.; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Energia solar. 2. Qualificação profissional. 3. Sistemas fotovoltaicos.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

ANDRÉ RICARDO MOCELIN

*“Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas
fotovoltaicos”*

Tese defendida e aprovada pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Roberto Zilles – PPGE/USP
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora

Prof^a. Dr^a. Eliane Aparecida Faria Amaral Fadigas – EP/USP

Prof. Dr. Murilo Tadeu Werneck Fagá – PPGE/USP

Prof. Dr. Federico Bernardino Morante Trigos – UFABC

Prof. Dr. João Tavares Pinho – UFPA

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Ricardo e Isabel, pela educação que me propiciaram e pelo incentivo mesmo distantes.

Às minhas irmãs, Patrícia, Lilian e Pâmela, e ao meu irmão, Luís, pela compreensão com minhas ausências e pelo apoio incondicional.

À minha esposa, Cássia, por cuidar da família, me proporcionando tranquilidade para me dedicar a este trabalho.

Aos meus filhos, André e Beatriz, pelos momentos plenos de felicidade que me proporcionam sempre.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Roberto Zilles, pelos inestimáveis ensinamentos na área, pela confiança e pelo apoio que sempre deu à minha carreira acadêmica e profissional.

Ao professor Adnei Melges de Andrade pelo constante incentivo às pesquisas em energia solar fotovoltaica realizadas no Instituto de Energia e Ambiente da USP.

Aos amigos do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, com os quais convivi durante os últimos dez anos e que colaboraram com os conteúdos necessários para a realização deste trabalho.

À Cássia pelo apoio no período de elaboração e pelo trabalho de revisão desta tese.

À dona Mirian Korolkovas pela presença sempre inteligente e sensata.

Ao Francisco Rocha pelas conversas e pelo exemplo de vida.

Ao Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo pela estrutura disponibilizada.

Ao INCT-EREEA pelo trabalho em rede que proporcionou ricas trocas de experiências.

Ao CNPq e à FAPESP pelo suporte financeiro que têm dado ao Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos da USP desde a sua criação, em 1995, o que possibilitou a concretização de vários sistemas fotovoltaicos mostrados nesta tese.

À CAPES pelas bolsas de doutorado, mestrado e inúmeras outras concedidas a pesquisadores e estudantes, contribuindo para formação de recursos humanos no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos da USP.

À CTEEP e à CESP pelo suporte ao projeto de P&D ANEEL 0068-0029/2011 – *Desenvolvimento de competências e avaliação de arranjos técnicos e comerciais em geração distribuída com sistemas fotovoltaicos conectados à rede*, que possibilitou a ampliação da estrutura física e laboratorial da Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP e contribuiu para a realização de cursos de formação profissional em sistemas fotovoltaicos.

SUMÁRIO

RESUMO	10
ABSTRACT	12
LISTA DE FIGURAS	14
LISTA DE TABELAS	27
LISTA DE SIGLAS	30
Introdução	33
1. Energia solar fotovoltaica	39
1.1. Conceitos e fundamentos	42
1.2. Panorama mundial	54
1.3. Cenário brasileiro	56
2. Capacitação de estrutura laboratorial	61
2.1. Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP	63
2.2. Acreditação de laboratório para ensaios	72
2.3. Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água	99
2.4. Sistemas fotovoltaicos para tratamento de água	109
2.5. Sistemas fotovoltaicos para produção de gelo	118
2.6. Sistemas fotovoltaicos para eletrificação domiciliar	129
2.7. Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica	137
2.8. Sistemas híbridos para geração de energia elétrica	152
3. Qualificação de recursos humanos	190
3.1. Políticas de qualificação profissional	192
3.2. Iniciativas de qualificação no Brasil	195
3.3. Experiências de formação do LSF-IEE-USP	198

3.4. Conteúdos curriculares	214
3.4.1 Planejamento e gestão de projetos	215
3.4.2 Instalação e manutenção de sistemas.....	239
3.4.3 Pesquisa e desenvolvimento	283
Conclusão.....	288
Referências bibliográficas	293

RESUMO

MOCELIN, A. R. **Qualificação profissional e capacitação laboratorial em sistemas fotovoltaicos**. 2014. 299 p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

Este trabalho utiliza a experiência do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (LSF-IEE-USP) para propor meios efetivos para qualificação de recursos humanos, dentro de laboratórios com qualidade reconhecida, com o intuito de aumentar a quantidade de especialistas na área. Para tanto, foi criado um local, na forma de laboratório, denominado Unidade de Capacitação Tecnológica, composto por sistemas fotovoltaicos isolados e conectados à rede e por duas minirredes híbridas de geração de energia (solar, diesel e rede elétrica), com sistemas de monitoramento próprios, que permitem a avaliação de diferentes estratégias de operação de sistemas fotovoltaicos. Tal Unidade foi concebida sob uma perspectiva didática, para possibilitar a apropriação das habilidades técnicas e conhecimentos tecnológicos necessários para: a) atuar nas diversas ocupações demandadas pelo setor (instaladores, projetistas e engenheiros); b) desenvolver pesquisas na área (especializações, mestrados e doutorados); e c) prestar suporte para iniciativas interessadas na aplicação da tecnologia fotovoltaica (ensaios, consultorias e treinamentos). A apresentação da Unidade conta com a descrição dos materiais, ferramentas, instrumentos e procedimentos utilizados para a acreditação dos laboratórios que a compõem, permitindo demonstrar a confiabilidade, credibilidade e universalidade de seus processos, especialmente no que se refere à realização de ensaios de conformidade em equipamentos fotovoltaicos. O trabalho também investiga iniciativas de capacitação que estão sendo realizadas em outras universidades, escolas técnicas e iniciativa privada, para compreender o perfil dos profissionais atuantes no mercado. A ideia é demonstrar o quanto é fundamental a criação de uma forma de certificação ou uma política instrutiva para a capacitação dos profissionais de sistemas fotovoltaicos, de forma a promover as boas práticas e inibir aquelas que comprometam a credibilidade da tecnologia. Esta tese demonstra que laboratórios capacitados, como a Unidade descrita neste trabalho,

apresentam os elementos necessários para produção e divulgação de conhecimentos, desenvolvimento de produtos, prestação de serviços e treinamento de profissionais requeridos para a expansão do setor, podendo colaborar para a consolidação da energia fotovoltaica como uma alternativa eficaz e confiável no cenário energético brasileiro.

Palavras-chave: capacitação laboratorial, qualificação profissional, energia solar, sistemas fotovoltaicos, sistemas híbridos, minirredes.

ABSTRACT

MOCELIN, A. R **Professional and laboratory qualification in photovoltaic systems**. 2014. 299 p. PhD. Thesis. Postgraduate Program in Energy. University of São Paulo.

This work uses the experience of the Photovoltaic Systems Laboratory of the Institute for Energy and Environment of the University of São Paulo (LSF-IEE-USP) to propose effective ways for the qualification of human resources within laboratories with recognized quality, in order to increase the amount of experts. Thus, a site was created in the form of laboratory, named Technology Skills Unit, composed of individual photovoltaic systems and two hybrid power systems (solar, diesel and power grid), with monitoring systems that allows evaluation of different operating of photovoltaic systems. This unit is designed in a didactic perspective to enable the appropriation of technical skills and technological knowledge necessary for: a) act in different occupations demanded by the sector (installers, designers and engineers), b) develop research in the area and c) provide support for initiatives interested in the application of photovoltaic technology. The presentation of the Unit has the description of the materials, tools, instruments and procedures for the accreditation of laboratories that comprise it, allowing demonstrate the reliability, credibility and universality of its processes, especially with regard to the testing of conformity in photovoltaic equipment. This study also investigates training initiatives being undertaken at other universities, technical schools, and private initiative to understand the profile of the professionals working in the market. The idea is to demonstrate how essential is the creation of a form of certification or an instructive policy for the professional of photovoltaic in order to promote good practice and inhibit those that undermine the credibility of technology. This thesis demonstrates that trained laboratory personnel with the structure proposed in this paper and accredited as is described, presents the necessary elements for the dissemination of technical and scientific knowledge required to qualify professionals specializing in photovoltaic applications, and may contribute to the consolidation of photovoltaic solar energy

as effective and reliable alternative to the energy scenario that is imposed in Brazil today.

Keywords: laboratory qualification, professional qualification, solar energy, photovoltaic systems, hybrid systems, minigrids.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais diferenças entre coletor solar e módulo fotovoltaico.	41
Figura 2: Principais aplicações da energia solar fotovoltaica no mundo.	46
Figura 3: Sistema fotovoltaico para bombeamento de água.	47
Figura 4: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água.	48
Figura 5: Sistema fotovoltaico para produção de gelo.	49
Figura 6: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar.	50
Figura 7: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica.	51
Figura 8: Representação da matriz elétrica brasileira.	52
Figura 9: Sistema híbrido para geração de energia elétrica.	53
Figura 10: Representação da estrutura física do LSF-IEE-USP.	66
Figura 11: Laboratório para ensaios em equipamentos de sistemas fotovoltaicos isolados – foto.	67
Figura 12: Laboratório para ensaios em equipamentos de sistemas fotovoltaicos isolados.	67
Figura 13: Laboratório para ensaios em equipamentos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica – foto.	68
Figura 14: Laboratório para ensaios em equipamentos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.	68
Figura 15: Campo de prova para ensaios em sistemas fotovoltaicos – foto 1.	69
Figura 16: Campo de prova para ensaios em sistemas fotovoltaicos – foto 2.	70
Figura 17: Campo de prova para ensaios em sistemas fotovoltaicos – representação.	70
Figura 18: Sala de treinamento em sistemas fotovoltaicos – foto.	71
Figura 19: Sala de treinamento em sistemas fotovoltaicos – representação.	72

Figura 20: Estação meteorológica do LSF-IEE-USP.....	74
Figura 21: Ensaio em módulo fotovoltaico – pré-condicionamento.....	76
Figura 22: Ensaio em módulo fotovoltaico – inspeção visual.....	77
Figura 23: Ensaio em módulo fotovoltaico – medição a Sol real.....	78
Figura 24: Ensaio em módulo fotovoltaico – carga eletrônica e sensores para medição a Sol real.....	79
Figura 25: Ensaio em módulo fotovoltaico – simulador solar do LSF-IEE-USP.....	80
Figura 26: Ensaio em módulo fotovoltaico – sala escura do simulador solar.....	80
Figura 27: Ensaio em módulo fotovoltaico – lâmpada <i>Xenon</i> do simulador solar....	81
Figura 28: Ensaio em módulo fotovoltaico – estrutura de suporte para módulo e célula de referência do simulador solar.....	82
Figura 29: Ensaio em módulo fotovoltaico – curva medida e etiqueta de eficiência do INMETRO.....	83
Figura 30: Ensaio em módulo fotovoltaico – isolamento elétrico.....	84
Figura 31: Bancada de ensaios para controladores de carga e descarga.....	86
Figura 32: Bancada de ensaios em inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos isolados.....	89
Figura 33: Bancada de ensaios em inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.....	92
Figura 34: Sistema fotovoltaico para bombeamento de água – configuração com conversor de frequência.....	99
Figura 35: Sistema fotovoltaico para bombeamento de água – configuração com sistema híbrido.....	100
Figura 36: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – geradores fotovoltaicos.....	101
Figura 37: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – montagem de ensaio com coluna de água conhecida.....	102

Figura 38: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – bancada para ensaios de operacionalidade e disponibilidade.....	103
Figura 39: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – representação da bancada para ensaios.....	104
Figura 40: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – quadro elétrico com conversor de frequência.....	105
Figura 41: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – quadro elétrico para conexão com o sistema híbrido.	105
Figura 42: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – alguns conversores de frequência e motobombas testados.....	106
Figura 43: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – aquisição de dados.	107
Figura 44: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – gráfico operacional.....	108
Figura 45: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – configuração como sistema individual com bateria.	110
Figura 46: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – configuração com sistema híbrido.....	111
Figura 47: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água do LSF-IEE-USP.	112
Figura 48: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – bancada de ensaio.	113
Figura 49: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – equipamento dessalinizador.....	114
Figura 50: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – detalhes do dessalinizador.....	114
Figura 51: Ensaios em sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água – aquisição de dados.....	116
Figura 52: Ensaios em sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água – gráfico operacional.....	116

Figura 53: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – configuração com conversor de frequência.	119
Figura 54: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – configuração com sistema híbrido.....	120
Figura 55: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – gerador fotovoltaico.....	121
Figura 56: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – máquina de gelo do LSF-IEE-USP.....	121
Figura 57: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – motor e compressor.....	122
Figura 58: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – quadros elétricos para as configurações com sistema híbrido e com conversor de frequência.	123
Figura 59: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – diagrama em blocos.	124
Figura 60: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – circuito refrigerante da máquina para produção de gelo.	124
Figura 61: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – compartimento interno e fôrmas da máquina de gelo.....	125
Figura 62: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – gelo produzido em um dia.	126
Figura 63: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – aquisição de dados.....	126
Figura 64: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – gráfico operacional.....	127
Figura 65: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar – configuração com sistema individual.	130
Figura 66: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar – configuração com sistema híbrido.....	131
Figura 67: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar do LSF-IEE-USP – protótipo de escola rural.	132
Figura 68: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar – instalações internas.	133

Figura 69: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar – vista do abrigo para baterias e da caixa de água da habitação.....	134
Figura 70: Ensaios em sistemas fotovoltaicos para eletrificação domiciliar – aquisição de dados.....	135
Figura 71: Ensaios em sistemas fotovoltaicos para eletrificação domiciliar – gráfico operacional.....	135
Figura 72: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica de uma concessionária de energia.	138
Figura 73: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – seguidor solar de um eixo do LSF-IEE-USP.....	138
Figura 74: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – estrutura de suporte e quadro elétrico de controle do seguidor solar de um eixo.	140
Figura 75: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – quadro elétrico de controle do seguidor solar de um eixo.....	140
Figura 76: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – diagrama em blocos da unidade de controle do seguidor solar de um eixo.	141
Figura 77: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – fotos dos componentes da unidade de controle do seguidor solar de um eixo.....	142
Figura 78: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – seguidores solares de dois eixos do LSF-IEE-USP.	143
Figura 79: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – inversores c.c./c.a. e quadros elétricos dos seguidores de dois eixos.	143
Figura 80: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – estação meteorológica dos seguidores de dois eixos.....	144
Figura 81: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – piranômetros, esfera de sombreamento e sistema para aquisição e transmissão de dados dos seguidores de dois eixos.....	145

Figura 82: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – vista dos sistemas do LSF instalados no terreno, fachada e telhado do prédio de administração do IEE-USP.....	145
Figura 83: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – vista da fachada do prédio de administração do IEE-USP.....	146
Figura 84: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – eletrocentro.....	147
Figura 85: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – painel de comando do inversor instalado no eletrocentro.....	147
Figura 86: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – vista do telhado do prédio de administração do IEE-USP.....	148
Figura 87: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – vista de alguns arranjos e do transformador de 75 kVA.	149
Figura 88: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – gráfico operacional.....	150
Figura 89: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – gráfico operacional do sistema fotovoltaico do LSF instalado na fachada do prédio da administração do IEE-USP.	151
Figura 90: Sistemas híbridos para geração de eletricidade – minirrede isolada ou conectada à rede elétrica convencional.....	154
Figura 91: Sistema híbrido para geração de energia elétrica do LSF-IEE-USP – configuração monofásica.....	155
Figura 92: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – geradores fotovoltaicos do sistema monofásico.....	156
Figura 93: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – componentes do acoplamento c.c. do sistema monofásico.....	157
Figura 94: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – inversor bidirecional, inversores c.c./c.a. de conexão à rede, controlador de carga e quadros elétricos do sistema monofásico.....	157

Figura 95: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadro de transferência e gerador a diesel do sistema monofásico.....	158
Figura 96: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – aquisição de dados do sistema monofásico.	158
Figura 97: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – tela para visualização de dados via <i>web</i> do sistema monofásico.....	159
Figura 98: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – <i>display</i> para visualização de variáveis do sistema monofásico.....	159
Figura 99: Sistema híbrido para geração de energia elétrica do LSF-IEE-USP – configuração trifásica.....	161
Figura 100: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – geradores fotovoltaicos para acoplamento c.a.	162
Figura 101: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – inversores de conexão à minirrede.....	162
Figura 102: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – geradores fotovoltaicos para acoplamento c.c.	163
Figura 103: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – outros geradores fotovoltaicos para acoplamento c.c.	164
Figura 104: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – vista geral dos equipamentos para acoplamento c.c.....	164
Figura 105: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadro elétrico para acoplamento c.c.	165
Figura 106: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – controladores de carga do acoplamento c.c.....	166
Figura 107: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – banco de baterias e quadro de fusíveis.	166
Figura 108: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadros elétricos e inversores bidirecionais.	167
Figura 109: Sistema híbrido – gerador a diesel.	169

Figura 110: Sistema híbrido – painel para visualização de variáveis do conjunto motogerador diesel.....	170
Figura 111: Sistema híbrido – quadro elétrico de entrada das fontes c.a.....	171
Figura 112: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – transformador de entrada.....	172
Figura 113: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadro de acoplamento entre as fontes.	173
Figura 114: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – diagrama elétrico do quadro de acoplamento entre as fontes.	173
Figura 115: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadro elétrico de saída c.a. para as cargas.....	174
Figura 116: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – transformador de saída.....	175
Figura 117: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – cargas resistivas.	176
Figura 118: Sistema híbrido trifásico – aquisição de dados.....	177
Figura 119: Sistema híbrido trifásico – tela de visualização de dados dos equipamentos SMA.	178
Figura 120: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – <i>display</i> para visualização de variáveis.	178
Figura 121: Sistema híbrido trifásico – tela de visualização de dados dos equipamentos <i>Landys Gyr</i>	179
Figura 122: Sistema híbrido trifásico – tela de visualização de dados dos equipamentos <i>Agilent</i>	180
Figura 123: Sistema híbrido trifásico – tela para visualização de dados de todos os equipamentos.....	181
Figura 124: Sistema híbrido trifásico – gráfico operacional 1.	181
Figura 125: Sistema híbrido trifásico – gráfico operacional 2.	182

Figura 126:Experiências de formação do LSF – aula em comunidade no Alto Rio Solimões-AM.....	205
Figura 127: Experiências de formação do LSF – aula prática no Vale do Ribeira-SP.	205
Figura 128: Experiências de formação do LSF – aula em assentamento rural no Pontal do Paranapanema.....	206
Figura 129: Experiências de formação do LSF – aula prática de conexão de módulos fotovoltaicos.	206
Figura 130: Experiências de formação do LSF – aula com <i>kits</i> didáticos em comunidade no Médio Rio Solimões-AM.....	207
Figura 131: Experiências de formação do LSF – aula prática com comunitários. .	208
Figura 132: Experiências de formação do LSF – aula com <i>kit</i> didático para alunos de graduação da USP.	209
Figura 133: Experiências de formação do LSF – aula prática para alunos de graduação da USP.	209
Figura 134: Experiências de formação do LSF – aula com <i>kit</i> didático na cidade de Arequipa no Peru.....	210
Figura 135: Experiências de formação do LSF – aula prática para alunos na cidade de Arequipa no Peru.....	211
Figura 136: Experiência de formação do LSF – <i>kits</i> didáticos para instalações elétricas.	212
Figura 137: Experiências de formação do LSF – <i>kits</i> didáticos para sistemas fotovoltaicos domiciliares.	212
Figura 138: Experiência de formação do LSF – <i>kits</i> didáticos para sistemas fotovoltaicos conectado à rede elétrica.	213
Figura 139: Visão sistêmica das inter-relações existentes na instalação e gestão de sistemas fotovoltaicos.....	230
Figura 140: Planejamento de projetos – embarcações para logística de transporte.	233

Figura 141: Planejamento de projetos – reunião para apresentação da proposta.	234
Figura 142: Planejamento de projetos – verificação da situação pré-eletrificação.	235
Figura 143: Planejamento de projetos – gastos com energéticos preexistentes.	235
Figura 144: Planejamento de projetos – diagrama elétrico geral.....	238
Figura 145: Planejamento de projetos – diagrama elétrico da rede de distribuição.	238
Figura 146: Planejamento de projetos – diagrama elétrico da área de geração.	239
Figura 147: Instalação de sistemas – mapa do Alto Solimões.....	242
Figura 148: Instalação de sistemas – conferência dos materiais.....	242
Figura 149: Instalação de bombeamento – vala, canos, quadro elétrico e módulos fotovoltaicos.	243
Figura 150: Instalação de bombeamento – vista de um sistema no Alto Rio Solimões.....	244
Figura 151: Instalação de bombeamento – boca do poço, módulos fotovoltaicos e caixas de água.	244
Figura 152: Instalação de bombeamento – água limpa obtida com sistema fotovoltaico e suja utilizada antes da instalação do sistema.	245
Figura 153: Instalação de sistema fotovoltaico para radiofonia – poste com módulos fotovoltaicos.....	246
Figura 154: Instalação de radiofonia – instalação de antenas e fixação de postes.	246
Figura 155: Instalação de radiofonia – antenas e aparelho de rádio.....	247
Figura 156: Instalação de sistemas – mapa da Ilha do Cardoso.	248
Figura 157: Instalação de sistemas – transporte marítimo.....	249
Figura 158: Instalação de sistemas – comunitários e equipe transportando materiais.	249

Figura 159: Instalação de sistemas – preparação da estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos.....	250
Figura 160: Instalação de sistemas – conexão elétrica entre os módulos fotovoltaicos e preparação do poste para sustentação do arranjo fotovoltaico.	250
Figura 161: Instalação de sistemas – posicionamento e inclinação do arranjo fotovoltaico.	251
Figura 162: Instalação de sistemas – baterias.....	251
Figura 163: Instalação de sistemas – quadro elétrico no interior de um domicílio.	252
Figura 164: Instalação de sistemas – residência eletrificada com energia solar..	253
Figura 165: Instalação de sistemas – equipamentos de uso final de energia.....	253
Figura 166: Instalação de sistemas - sistemas fotovoltaicos para uso comunitário na comunidade de Varadouro.....	254
Figura 167: Instalação de sistemas – detalhes da lavanderia fotovoltaica de Varadouro.....	255
Figura 168: Instalação de sistemas – seguidor solar.	256
Figura 169: Instalação de seguidor solar – posicionamento do poste de sustentação do arranjo fotovoltaico.	256
Figura 170: Instalação de seguidor solar – arranjos de módulos fotovoltaicos e de módulos de concentração.....	257
Figura 171: Instalação de seguidor solar – posicionamento de um arranjo de módulos fotovoltaicos de concentração.	257
Figura 172: Instalação de seguidor solar – soldagem de partes da estrutura de sustentação.	258
Figura 173: Instalação de seguidor solar – vista dos sistemas completos.	258
Figura 174: Instalação de central fotovoltaica – transporte dos materiais.....	259

Figura 175: Instalação de central fotovoltaica – bases de concreto e estruturas de fixação.	259
Figura 176: Instalação de central fotovoltaica – montagem dos módulos fotovoltaicos.	260
Figura 177: Instalação de sistemas sobre telhado – montagem das estruturas. ...	260
Figura 178: Instalação de sistema fotovoltaico para sombreamento de veículos.	261
Figura 179: Comissionamento de sistemas fotovoltaicos - quadro elétrico de distribuição.	263
Figura 180: Comissionamento de sistemas fotovoltaicos – medições em sistemas domiciliares.	264
Figura 181: Comissionamento de sistemas fotovoltaicos – medições em conversores de frequência e em sistemas híbridos.	265
Figura 182: Comissionamento de sistemas fotovoltaicos – medições em banco de baterias.	266
Figura 183: Manutenção de sistemas domiciliares – limpeza de módulos fotovoltaicos e do abrigo para baterias.	268
Figura 184: Manutenção de sistemas domiciliares – limpeza de módulos fotovoltaicos e colocação de vaselina nos bornes das baterias.	268
Figura 185: Manutenção de sistemas conectados à rede elétrica – lavagem dos módulos fotovoltaicos de concentração.	269
Figura 186: Manutenção de sistemas domiciliares – substituição do controlador de carga e descarga.	270
Figura 187: Manutenção de sistemas para bombeamento de água – reparo de boia.	271
Figura 188: Instalação de sistemas fotovoltaicos – principais ferramentas.	276
Figura 189: Instalação de sistemas fotovoltaicos – ferramentas e instrumentos.	276
Figura 190: Instalação de sistemas fotovoltaicos – ferramentas de hidráulica.	277

Figura 191: Instalação de sistemas fotovoltaicos – ferramentas de construção civil.
.....278

Figura 192: Pesquisa e desenvolvimento – automação de bancada para ensaios.286

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Conjunto das variáveis medidas pela estação meteorológica do LSF-IEE-USP.	74
Tabela 2: Ensaio de etiquetagem para módulos fotovoltaicos.....	75
Tabela 3: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de etiquetagem de módulo fotovoltaico.	84
Tabela 4: Ensaio de etiquetagem para controladores de carga e descarga.	86
Tabela 5: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de etiquetagem de controladores de carga e descarga.	87
Tabela 6: Ensaio de etiquetagem em inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos isolados.....	89
Tabela 7: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de etiquetagem de inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos isolados.....	91
Tabela 8: Ensaio de etiquetagem em inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.	93
Tabela 9: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de etiquetagem de inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica....	94
Tabela 10: Requisitos necessários para a acreditação de laboratório de ensaios em equipamentos e sistemas fotovoltaicos.	95
Tabela 11: Ensaio de operacionalidade e disponibilidade energética realizados em sistemas fotovoltaicos.....	98
Tabela 12: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água do LSF-IEE-USP.....	108
Tabela 13: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – características do dessalinizador.....	115
Tabela 14: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água do LSF-IEE-USP.....	117

Tabela 15: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos para produção de gelo do LSF-IEE-USP.	128
Tabela 16: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos domiciliares do LSF-IEE-USP.	136
Tabela 17: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica do LSF-IEE-USP.	151
Tabela 18: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas híbridos de energia do LSF-IEE-USP.	186
Tabela 19: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água.	219
Tabela 20: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água.	221
Tabela 21: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos para produção de gelo.	222
Tabela 22: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos domiciliares.	224
Tabela 23: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.	226
Tabela 24: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas híbridos de geração de energia elétrica.	227
Tabela 25: Requisitos necessários para a instalação e gestão de sistemas fotovoltaicos.	231
Tabela 26: Planejamento de projetos – esforços envolvidos para aquisição de gelo.	236
Tabela 27: Valores de referência estabelecidos pela resolução ANEEL 493/2012 para SIGFI e MIGDI.	237
Tabela 28: Lista genérica de materiais utilizados na instalação de sistemas fotovoltaicos.	272

Tabela 29: Lista específica de materiais para a instalação de sistemas fotovoltaicos.	
.....	273
Tabela 30: Lista genérica de ferramentas utilizadas na instalação de sistemas fotovoltaicos.	274
Tabela 31: Lista específica de ferramentas para a instalação de sistemas fotovoltaicos.	275
Tabela 32: Conteúdo programático – nivelamento.	280
Tabela 33: Conteúdo programático – componentes e sistemas fotovoltaicos.	281
Tabela 34: Conteúdo programático – sistemas híbridos.	282

LISTA DE SIGLAS

ABENS – Associação Brasileira de Energia Solar.

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Eletroeletrônica.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

ARMINES – *Center for Energy & Processes of the Ecole des Mines de Paris.*

c.a. – Corrente Alternada.

CBENS – Congresso Brasileiro de Energia Solar.

c.c. – Corrente Contínua.

CEFET – Centro Federal de Educação Tecnológica.

CEPEL - Centro de Pesquisa de Energia Elétrica.

CESP – Companhia Energética de São Paulo.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

CPqD – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações.

CREA – Conselho Regional de Engenharia e Agronomia.

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito.

CTEEP – Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.

DIC – Duração de Interrupção por Unidade Consumidora.

DOU – Diário Oficial da União.

DPS – Dispositivo de Proteção contra Surto.

ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia do INMETRO.

ERFD – Eletrificação Rural Fotovoltaica Domiciliar.

ETA – Escola Técnica Agrícola.

ETE – Escola Técnica Estadual.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde.

GEDAE – Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas.

GPIB – *General Purpose Interface Bus*.

GTES – Grupo de Trabalho de Energia Solar.

GT-FOT – Grupo de Trabalho Fotovoltaico do INMETRO.

IDEAL – Instituto para o Desenvolvimento das Energias Alternativas na América Latina.

IDSMM – Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá.

IEC – *International Electrotechnical Commission*.

IEE – Instituto de Energia e Ambiente¹.

IFSP – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo.

INCT-EREEA – Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.

INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

ISES – *International Solar Energy Society*.

ISSET – *Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology*.

ISO – *International Organization for Standardization*.

LDB – Leis de Diretrizes e Bases da Educação.

LSF – Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos.

MIGDI – Microssistema Isolado de Geração e Distribuição de Energia Elétrica.

MME – Ministério de Minas e Energia.

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego.

¹ Antigo Instituto de Eletrotécnica e Energia.

NBR – Norma Brasileira editada pela ABNT.

NR – Norma Regulamentadora do MTE.

NTUA – *National Technical University of Athens*.

OIT – Organização Internacional do Trabalho.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro.

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO.

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento.

PNQ – Programa Nacional de Qualificação do Governo Federal.

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica da ANEEL.

PUC-RS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial.

SFD – Sistema Fotovoltaico Domiciliar.

SIGFI – Sistema Individual de Geração de Energia Elétrica com Fonte Intermitente.

TCU – Tribunal de Contas da União.

UC – Unidade Consumidora.

UFPA – Universidade Federal do Pará.

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco.

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

UMIST – *University of Manchester – Institute of Science and Technology*.

USP – Universidade de São Paulo.

Introdução

O aumento da demanda de energia e a crescente preocupação ambiental abrem espaço para a inserção de fontes mais limpas e renováveis na matriz energética mundial. Entre as alternativas existentes, destaca-se a energia solar, originária de uma fonte praticamente inesgotável e cuja utilização tem se acentuado nos últimos anos em função de grandes avanços tecnológicos. No Brasil, além do alto índice de radiação solar, o histórico de aumento de eficiência, a queda dos custos e a regulação favorável à instalação de sistemas fotovoltaicos, tanto em centros urbanos quanto no meio rural, têm impulsionado instituições públicas e privadas interessadas no desenvolvimento do setor.

Contudo, diversas pesquisas acadêmicas relacionadas à análise de iniciativas de eletrificação com sistemas fotovoltaicos no Brasil permitiram analisar o processo de implementação e dispuseram a respeito das dificuldades encontradas para a consolidação da opção no país, dentre as quais encontra-se a escassez de mão de obra qualificada para instalação e, sobretudo se pensado em longo prazo, para a manutenção dos sistemas. Uma das piores consequências da falta de conhecimento é que ela pode levar projetos de eletrificação a serem mal projetados e mal executados, influenciando negativamente na reputação da tecnologia e fazendo com que as aplicações sejam menos absorvidas pelo mercado.

Dessa forma, um grande empecilho para o desenvolvimento do setor no país é a carência de profissionais especializados e a insuficiência de locais específicos para sua formação. A presente tese discorre a respeito da capacitação tecnológica de laboratórios e da qualificação profissional de recursos humanos em energia solar fotovoltaica, partindo da experiência acumulada em mais de 18 anos de ensino, pesquisa e extensão do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (LSF-IEE-USP). Propõe-se trazer contribuições não só para o processo educativo de caráter exclusivamente técnico, mas também para a reflexão quanto ao processo formativo e produtivo envolvido na consolidação desse tipo de energia na matriz energética brasileira.

O empecilho apontado por tais pesquisas revela a falta de investimento em formação de recursos humanos para atuar em projetos de eletrificação com

sistemas fotovoltaicos, ocasionando a falta de profissionais qualificados para trabalhar em todas as etapas de um processo de implantação e gestão. Isso tem conduzido a muitos insucessos que afetam a difusão e levam ao descrédito na eficácia da tecnologia fotovoltaica, causando graves obstáculos à sua expansão na matriz energética brasileira (ZILLES ET AL., 2009).

Esse quadro de referência está na contramão de manifestações de instituições, tanto públicas como privadas, apresentadas em publicações da área, interessadas no desenvolvimento da energia solar fotovoltaica no país. Essas publicações, além de divulgarem informações a respeito da implantação desse tipo de energia, fornecem diretrizes necessárias à ampliação de seu uso. É o caso, por exemplo, da *Proposta para a inserção da energia solar na matriz elétrica brasileira*, de junho de 2012, publicada pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE). Essa associação constituiu, em 2010, o Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos, com o propósito de reunir empresas interessadas na ampliação do uso dessa energia limpa e renovável no país, de modo a ir além dos sistemas isolados e outras aplicações especiais, onde tem sido amplamente utilizada nos últimos anos.

Na publicação supracitada, foi demonstrado que o mercado brasileiro de geração de energia elétrica a partir do recurso solar é extremamente promissor, tanto no meio urbano quanto no rural. Dentre os motivos, está o fato de o país apresentar uma fonte praticamente inesgotável do principal insumo, o Sol, em razão da sua localização geográfica, e de dispor em seu território da matéria-prima essencial para a produção do Silício, utilizado na fabricação das células fotovoltaicas e da eletrônica necessária ao condicionamento de potência.

O problema referente à qualificação de profissionais pode ser observado do ponto de vista da instalação e manutenção dos sistemas, mas igualmente do desenvolvimento de uma cadeia nacional de suprimentos fundamentais para sua consolidação. Esse cenário indica a existência de um amplo espaço para iniciativas de qualificação dos recursos humanos, pois o conhecimento a respeito da tecnologia solar fotovoltaica ainda está restrito a poucos especialistas e pesquisadores da área. Além disso, são poucos os locais que promovem a produção e a divulgação de conhecimentos sobre essa tecnologia.

A formação de profissionais qualificados torna-se ainda mais relevante em função dos avanços alcançados pelo marco regulatório brasileiro. Desde a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), vários decretos, leis e resoluções tiveram relação direta ou indireta com o incentivo ao uso de energias renováveis no Brasil. Nos últimos anos, o contexto político-regulatório sinalizou avanços que favorecem particularmente a implantação da tecnologia fotovoltaica, como a aprovação da Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, que dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica.

Além da lei da universalização, a Resolução ANEEL nº 493, de 05 de junho de 2012, que regulamenta o uso de Sistemas Individuais de Geração de Energia Elétrica por Fontes Intermitentes (SIGFIs) e de Microssistemas Isolados de Geração e Distribuição de Energia Elétrica (MIGDIs) para cumprimento das metas de universalização, e a Resolução nº 482, de 17 de abril de 2012, que estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e as regras para o sistema de compensação das concessionárias, são exemplos dos avanços ocorridos na esfera normativa.

Uma vez estabelecidas essas regras que viabilizam a implantação em larga escala da tecnologia fotovoltaica, torna-se fundamental que os novos sistemas fotovoltaicos sejam instalados adequadamente, comprovando sua viabilidade para a sociedade. Para que isso ocorra, torna-se evidente a existência de profissionais qualificados, sendo necessário, para tanto, que a transmissão do conhecimento se efetive e se expanda. Esta é uma problemática cuja resolução é a criação de iniciativas para a formação de profissionais especializados em sistemas fotovoltaicos.

Para que esse propósito se concretize com qualidade é preciso estabelecer estrutura laboratorial que congregue os elementos necessários para a difusão desses conhecimentos, constituindo-se como meio efetivo para elevar a quantidade de profissionais qualificados na tecnologia. Por esse motivo, é importante reforçar o dispositivo de ensino e pesquisa, fomentando a área solar fotovoltaica junto às universidades, laboratórios, instituições de ciência e tecnologia, etc.

Além disso, para que uma tecnologia como essa tenha sucesso e atraia interesse de investidores na produção de matéria prima e de módulos, é preciso que atinja um maior público consumidor, o que torna necessária sua aceitação pela sociedade, pois muitas inovações podem ser rejeitadas, mesmo apresentando soluções técnicas viáveis, por trazerem consigo valores que não correspondem às aspirações da população (SERPA, 2001). A geração de empregos e o aumento da renda dentro da cadeia produtiva são fatores que podem colaborar para a aceitação da tecnologia e consequente expansão do setor. Cabe lembrar que a produção científica só faz sentido se for voltada para beneficiar a sociedade e melhorar a qualidade de vida dos indivíduos.

Diante dessas condições de contorno, formula-se a seguinte hipótese: o estabelecimento de estrutura laboratorial para qualificação de recursos humanos e a socialização de procedimentos técnicos padronizados são instrumentos que potencializam a difusão das aplicações fotovoltaicas.

O presente trabalho se propõe então a abarcar essas duas necessidades: a estruturação de laboratórios e a qualificação de recursos humanos. Tais finalidades foram atendidas por meio da criação de um local, na forma de laboratório, denominado Unidade de Capacitação Tecnológica, composta pelos sistemas fotovoltaicos implementados no LSF-IEE-USP desde sua fundação e por duas minirredes híbridas de geração de energia (solar, diesel, rede elétrica), com sistemas de controle e monitoramento que permitem avaliar diferentes estratégias de operação e gestão desses sistemas, cujas instalações foram realizadas durante o desenvolvimento desta tese.

A Unidade de Capacitação Tecnológica descrita constitui-se então como um centro de difusão dos conhecimentos científicos e tecnológicos, treinamento de profissionais e desenvolvimento de produtos e serviços, ou seja, um local para centralização e difusão do saber e da prática sobre energia solar fotovoltaica.

O objetivo geral desta pesquisa de doutorado é apresentar os procedimentos utilizados e os aprendizados obtidos no estabelecimento da estrutura laboratorial dessa Unidade, com foco no treinamento de profissionais, no desenvolvimento de pesquisas na área e na realização de ensaios de conformidade em componentes e sistemas fotovoltaicos.

Para tanto, foi realizado o levantamento das pesquisas aplicadas para implementação de todos os sistemas dessa estrutura, a fim de descrever tais sistemas e os procedimentos utilizados em sua instalação e gestão. As metodologias utilizadas em sua construção permitem a proposição de ementas de conteúdos para as diferentes esferas da capacitação em sistemas fotovoltaicos, auxiliando na qualificação profissional de recursos humanos aptos a: a) desenvolver pesquisas na área em nível de especialização, mestrado e doutorado; b) atuar nas diversas ocupações demandadas pelo setor, como instaladores, projetistas e engenheiros; e c) prestar suporte para iniciativas interessadas na aplicação da tecnologia fotovoltaica.

Além disso, foram pesquisadas iniciativas de capacitação existentes, realizadas em outras universidades, escolas técnicas e iniciativa privada, para compreender o perfil dos profissionais atuantes no mercado. O resultado obtido demonstra que é fundamental a criação de uma forma de certificação ou uma política instrutiva para tais iniciativas, de forma a promover as boas práticas e inibir aquelas que comprometam a credibilidade da tecnologia.

Tendo exposto o objetivo desta tese e os principais aspectos nela abordados, segue uma breve apresentação dos capítulos que a compõem.

O primeiro capítulo traça um panorama da energia solar fotovoltaica, apresentando os principais conceitos e fundamentos da tecnologia e discorrendo a respeito de sua evolução no cenário mundial e de suas perspectivas no Brasil, com diretrizes que apontam caminhos possíveis para a sua expansão na matriz elétrica do país.

O segundo trata da capacitação de laboratórios especializados em sistemas fotovoltaicos, utilizando como base a estrutura física do LSF-IEE-USP, utilizada como referência por possuir os requisitos necessários para a obtenção da acreditação laboratorial junto a organismos metrológicos. Para sua descrição, realizou-se uma síntese dos trabalhos e pesquisas desenvolvidos por diversos profissionais e pesquisadores que contribuíram para sua constituição.

O terceiro capítulo apresenta as contribuições para a formação de profissionais em energia solar fotovoltaica, a partir das experiências adquiridas em trabalhos de campo e na instalação dos sistemas da Unidade de Capacitação

Tecnológica, incluindo uma discussão a respeito do processo formativo de profissionais para atuar nas diversas atividades requeridas para promover o desenvolvimento do setor. Além disso, apresenta um levantamento das principais instituições de pesquisa do país e de iniciativas privadas que promovem a qualificação de recursos humanos na área.

1. Energia solar fotovoltaica

Há um crescente aumento da demanda energética no mundo, provocado principalmente pelo crescimento populacional e pelo desenvolvimento tecnológico e industrial da sociedade. A matriz energética, composta principalmente por fontes primárias, dentre as quais se destacam petróleo, gás natural, carvão mineral, urânio, energia hidráulica, energia solar, energia eólica e biomassa, tem passado por profundas alterações nos últimos anos.

A prevalência do consumo dos combustíveis fósseis vem sendo profundamente questionada, não apenas por ser um recurso esgotável, mas também pelas preocupações ambientais. O aumento da emissão de gases de efeito estufa e da poluição do ar, que causam danos à qualidade de vida, aumento de doenças respiratórias e gastos públicos com saúde, são alguns dos fatores que contribuíram para a busca por alternativas energéticas baseadas em fontes menos agressivas e menos poluentes.

A energia solar fotovoltaica aparece como promissora entre as alternativas, por não emitir poluentes no processo de geração e por ser uma fonte praticamente inesgotável e acessível em todos os pontos do mundo. Além disso, a cadeia produtiva de módulos fotovoltaicos é igualmente de baixo impacto ambiental, pois o descarte correto dos rejeitos químicos decorrentes de sua produção evita efeitos negativos. As emissões de gases de efeito estufa resultantes do processo de fabricação dos geradores fotovoltaicos são extremamente baixas e a energia empregada em sua produção é compensada em poucos anos de funcionamento.

O Brasil tem alto potencial para a inserção da energia solar em sua matriz energética, de um lado porque existe uma grande demanda por parte dos domicílios não eletrificados e que têm esse direito garantido por lei; por outro lado, porque cresce o interesse e a consciência da sociedade em formas ambientalmente corretas de geração de energia. Porém, para tratar a respeito da inserção da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira é preciso, primeiramente, entender de que modo esse tipo de energia tem se expandido no mundo.

Segundo dados do relatório *Revolução energética: a caminho do desenvolvimento limpo* (GREENPEACE, 2012) e do *Global Market Outlook for photovoltaics* de 2013 (EPIA, 2013), o mercado mundial de módulos fotovoltaicos cresceu mais de 40 % ao ano entre 2005 e 2013, focado em aumentar a eficiência energética e reduzir o uso de matéria-prima. As células fotovoltaicas têm registrado queda de preço, seguindo uma redução aproximada de 20 % a cada duplicação da capacidade instalada. A perspectiva é de que, nos próximos anos, a produção de eletricidade com módulos fotovoltaicos torne-se competitiva em relação às formas tradicionais de geração de energia.

A energia solar pode ser aproveitada de diferentes formas, sendo as duas principais as aplicações térmicas e as fotovoltaicas. As aplicações térmicas envolvem fenômenos de transferência de calor e variação de temperatura. A energia solar térmica é utilizada nos setores residencial, comercial e industrial e seus principais usos são aquecimento de água para utilização em chuveiros, torneiras e piscinas, secagem de produtos em unidades de beneficiamento, preparação de alimentos em cozinhas solares e pré-aquecimento de líquidos em processos industriais. Os meios utilizados para promover a transferência de calor e a elevação de temperatura vão desde a simples exposição ao Sol dos produtos até o uso de coletores solares acoplados em acumuladores térmicos.

A energia solar fotovoltaica, que é tratada nesta tese, é utilizada para geração de energia elétrica nos setores residencial, comercial e industrial. Nas aplicações fotovoltaicas, o efeito fotoelétrico é o fenômeno que rege a conversão de fótons em eletricidade, promovendo o fornecimento de energia elétrica para sistemas isolados ou conectados à rede elétrica convencional. O aproveitamento da energia solar para gerar eletricidade é conseguido por meio de módulos fotovoltaicos.

Historicamente, as primeiras aplicações dessa energia surgiram para prover eletricidade para sistemas espaciais, como os satélites de comunicação e, mais recentemente, para a estação espacial internacional. Com o passar do tempo, as aplicações terrestres começaram a se difundir e os principais usos hoje em dia estão relacionados à eletrificação em regiões remotas, fornecimento de água, conexão à rede elétrica convencional e sistemas híbridos de energia.

As aplicações térmicas e fotovoltaicas da energia solar envolvem fenômenos físicos distintos. Para o equacionamento da física envolvida nos coletores solares utilizam-se conceitos de transferência de calor advindos da termodinâmica. Para o equacionamento da física envolvida nos módulos fotovoltaicos utilizam-se conceitos da física quântica moderna. Este trabalho trata especificamente da energia solar fotovoltaica; no entanto, convém mencionar que o tema energia solar térmica é de extrema importância para o setor elétrico, devido ao grande impacto que os chuveiros elétricos e os sistemas de aquecimento causam na curva de carga do sistema elétrico brasileiro.

As ilustrações da Figura 1 evidenciam as diferenças entre aplicações térmicas e fotovoltaicas. Nota-se que, no caso da energia solar térmica, a água entra no sistema de aquecimento, passa por uma tubulação de cobre devidamente pintada e encapsulada com vidros e outras tubulações hidráulicas, formando o coletor solar. Ao fluir, a água recebe calor das tubulações aquecidas pela radiação vinda do Sol, o que provoca a elevação da sua temperatura. Já no módulo fotovoltaico, os fótons da radiação solar provocam o movimento de elétrons, gerando eletricidade em corrente contínua.

Figura 1: Principais diferenças entre coletor solar e módulo fotovoltaico.

A próxima seção apresenta os principais conceitos físicos envolvidos nas aplicações da energia solar fotovoltaica. Em seguida, é apresentado um breve panorama do desenvolvimento tecnológico em nível mundial, a trajetória de inserção da tecnologia no país, as perspectivas para expansão dessa fonte na matriz energética brasileira e, finalmente, algumas propostas para promover a expansão e a sustentabilidade de empreendimentos fotovoltaicos.

1.1. Conceitos e fundamentos

Os conhecimentos para atuar profissionalmente com energia solar fotovoltaica incluem, necessariamente, uma parte conceitual, que explica os fenômenos físicos envolvidos nas diferentes etapas da conversão de energia solar em energia elétrica. Esta seção apresenta os principais conceitos e fundamentos relacionados com aplicações fotovoltaicas, que são utilizados no decorrer deste trabalho, utilizando um método de explicação cronológica destes fenômenos físicos.

Tal método descreve o caminho dos fótons e elétrons no processo de conversão da radiação solar em eletricidade à medida que ele é percorrido, ou seja, vai sendo explicado seguindo uma ordem sequencial correspondente ao que ocorre na realidade. Inicia-se então com a explicação da fonte primária de energia, o Sol, percorre-se todo o caminho da radiação eletromagnética solar, do vácuo às interações na atmosfera terrestre e no material semicondutor dos módulos fotovoltaicos, finalizando com a explicação das diversas transformações e condicionamentos de potência necessários para a utilização da eletricidade em equipamentos de uso final.

Esta abordagem demonstra-se como uma boa prática nas experiências adquiridas durante a realização de treinamentos e cursos de formação ministrados nas dependências do LSF-IEE-USP, alcançando bons resultados na assimilação de conhecimentos.

O Sol é uma estrela de tamanho médio, cuja distância em relação à Terra varia devido à excentricidade da órbita terrestre. Como todas as estrelas, ele emite um espectro contínuo de radiação eletromagnética, cujo conhecimento permite, por meio de técnicas próprias da astronomia e astrofísica, determinar sua temperatura superficial e sua composição química. Atualmente, sabe-se que a temperatura do Sol se aproxima à de um corpo negro em equilíbrio termodinâmico a 6.000 K e que é formado basicamente por 85 % de Hidrogênio, 14,8 % de Hélio e 0,2 % de outros elementos (MACIEL, 1991).

A quantidade de energia que atinge o nosso planeta depende da geometria espacial existente entre a estrela Sol e o planeta Terra, denominada na literatura como geometria Sol-Terra. O conhecimento dessa geometria remete aos estudos de diversos astrônomos ao longo da história da humanidade. Nicolau Copérnico (1473-1543), Tycho Brahé (1546-1601), Giordano Bruno (1548-1600), Galileu Galilei (1564-1642) e Johannes Kepler (1571-1630) foram alguns estudiosos que trataram deste tema nos tempos modernos. A observação dos astros é uma prática milenar, que está imbricada na história do desenvolvimento intelectual dos seres humanos. Egípcios e gregos já demonstravam conhecimentos de particularidades da geometria Sol-Terra. Tales de Mileto (625-548 a.C.), por exemplo, se tornou célebre no ano de 585 a.C. ao prever um eclipse solar (BOUDENOT, 2001).

O efeito fotoelétrico é um fenômeno que ocorre em nível microscópico e que está relacionado com a transição de um elétron entre camadas da eletrosfera de um átomo. Ao interagir com a estrutura de um determinado átomo, os fótons provocam a passagem dos elétrons da camada de valência para a camada de condução deste átomo, que, uma vez nesta camada, podem deslocar-se pelo material formado pelo conjunto desses átomos.

A descrição detalhada do efeito fotoelétrico requer conhecimentos da área de física quântica, uma vez que o fenômeno de fazer saltar elétrons entre as camadas de valência e condução de um átomo envolve tratamentos estatísticos e de probabilidade. Para compreensão dos conceitos e aplicações da energia solar tratados nesta tese, basta a descrição geral, de que é um fenômeno que ocorre em determinados dispositivos e que converte a radiação solar em energia elétrica.

Células fotovoltaicas são dispositivos que convertem a radiação eletromagnética em eletricidade através do efeito fotoelétrico. Na prática, o resultado final é que os fótons da luz do Sol, ao se chocarem com os elétrons da célula fotovoltaica, produzem uma tensão elétrica entre os seus terminais positivo e negativo. Um conjunto de células fotovoltaicas devidamente conectadas e encapsuladas constitui um módulo fotovoltaico.

Os módulos fotovoltaicos são os elementos principais de um sistema fotovoltaico, pois sem eles não é possível converter radiação solar em eletricidade. No entanto, para que seja possível a utilização da energia solar para alimentar os equipamentos elétricos já existentes e amplamente difundidos, é preciso adequar a eletricidade gerada pelos módulos fotovoltaicos aos padrões dos equipamentos comercialmente disponíveis. A essa tarefa de adequar forma e valor da energia elétrica denomina-se condicionamento de potência.

Existem diversos equipamentos que realizam esta função, cada qual com sua topologia e função. No âmbito deste trabalho, os equipamentos para condicionamento de potência são conversores de frequência, controladores de carga e descarga, inversores c.c./c.a. para sistemas isolados, inversores c.c./c.a. para sistemas conectados à rede elétrica de uma concessionária de energia e inversores bidirecionais.

Devido ao caráter intermitente da energia solar, a energia convertida pelos módulos fotovoltaicos segue o padrão da radiação solar incidente: em dias de céu claro ao meio-dia, por exemplo, tem-se a energia máxima, já em dias nublados tem-se menos energia e à noite nenhuma energia é convertida, pois não há radiação solar incidindo na parte escura do globo terrestre. No entanto, muitas aplicações da energia solar têm justamente a função de prover eletricidade durante o dia e à noite, em lugares remotos onde não existe a rede elétrica convencional.

Para tais aplicações faz-se necessário o uso de acumuladores de energia, de forma que a energia solar incidente durante o dia possa ser armazenada para ser utilizada durante a noite. Para que isso ocorra, os módulos fotovoltaicos precisam ser conectados a outros equipamentos, tais como condicionadores de potência e acumuladores de energia. Ao conjunto de equipamentos formado pelo módulo fotovoltaico, condicionador de potência e acumulador de energia, conectados entre

si com o propósito de realizar uma determinada tarefa, denomina-se sistema fotovoltaico.

Existem diversas configurações e aplicações para os sistemas fotovoltaicos, cada qual com suas vantagens e desvantagens, cuja opção de escolha depende, entre outros critérios, de recursos financeiros, humanos e organizacionais. Dentre as aplicações da energia solar fotovoltaica, as que têm um maior potencial de utilização no país estão relacionadas ao bombeamento e tratamento de água, usos produtivos de energia, eletrificação de domicílios isolados, sistemas conectados à rede elétrica e energização de demandas autônomas.

A acumulação de energia nesses sistemas fotovoltaicos pode ocorrer de diversas maneiras, sendo que as mais comumente utilizadas são a acumulação eletroquímica, a acumulação em forma de energia potencial gravitacional, a inércia térmica e a interação com a rede elétrica. Estas formas são usadas, respectivamente, nos sistemas fotovoltaicos domiciliares, sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água, sistemas fotovoltaicos para produção de gelo e sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Uma vez apresentados os principais fenômenos e conceitos, parte-se para a explicação dos sistemas fotovoltaicos propriamente ditos, com a descrição de seus componentes e particularidades. Antes, porém, com o objetivo de proporcionar uma visão panorâmica do universo das principais aplicações da energia solar fotovoltaica no mundo, apresenta-se a figura 2.

Figura 2: Principais aplicações da energia solar fotovoltaica no mundo.

Fonte: Adaptado de Luque e Hegedus (2003).

As aplicações da energia solar fotovoltaica que podem ser implementadas em nosso cotidiano são inúmeras, mas são efetivadas por meio de um número reduzido de configurações, tais como sistemas que possuem ou não acumuladores e sistemas conectados à rede elétrica. Algumas aplicações mostradas na figura anterior merecem destaque, não somente porque podem contribuir para uma geração mais limpa de eletricidade, mas pelo potencial que possuem de melhorar a qualidade de vida de milhares de pessoas. Os sistemas fotovoltaicos capazes de realizar as tarefas mencionadas são brevemente descritos a seguir.

Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água são uma das mais difundidas aplicações da energia solar fotovoltaica no Brasil. Estima-se que existam cerca de 3.000 desses sistemas no país. Muitos não operam por uma série de fatores, dentre os quais destaca-se a aquisição de bombas e condicionadores de potência importados, sem uma consolidada rede de assistência técnica em território nacional, fato que prejudica a opção fotovoltaica em muitas regiões.

Apesar desses equívocos de planejamento e gestão, essa aplicação constitui-se como uma tecnologia madura e confiável, que pode trazer melhoria de qualidade de vida e geração de renda, como água para consumo humano ou para atividades produtivas como irrigação, criação de animais e processos de lavagem. A figura 3 ilustra os principais componentes de um sistema fotovoltaico para bombeamento de água, composto por gerador fotovoltaico, quadro elétrico e motobomba, esta última imersa em um poço de água e conectada eletricamente ao quadro elétrico e hidraulicamente à caixa de água.

Figura 3: Sistema fotovoltaico para bombeamento de água.

A água bombeada pelos sistemas fotovoltaicos muitas vezes não é própria para o consumo humano, sendo necessário realizar algum tipo de tratamento para torná-la potável. Existem diversas formas de tratamento de água. A escolha do método mais adequado depende das características da água e dos recursos humanos e materiais disponíveis. No escopo deste trabalho, o termo tratamento de água refere-se à dessalinização de água com a utilização de sistemas fotovoltaicos.

A figura 4 ilustra os principais componentes de um sistema para dessalinização de água, composto por gerador fotovoltaico, quadro elétrico e dessalinizador, conectado eletricamente ao quadro elétrico e hidraulicamente à caixa de água. O tamanho e a forma de apresentação do dessalinizador mostrado na figura 4 estão ampliados para facilitar a visualização dos componentes envolvidos.

Figura 4: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água.

Mesmo em muitos domicílios eletrificados com sistemas fotovoltaicos, a potência de tais sistemas contempla apenas o uso de geladeiras e refrigeradores de pequeno porte, que não atendem à demanda de produção de gelo requerida pela atividade de pesca. Para contornar este problema, devido à importância que o gelo possui na conservação de alimentos e na consequente geração de renda para tais famílias, os moradores são obrigados a percorrer longas distâncias para comprá-lo.

A produção de gelo nas próprias comunidades utilizando sistemas fotovoltaicos pode ser útil para a redução dos custos envolvidos no suprimento de gelo e para a diminuição da dependência de populações localizadas em regiões remotas que têm a atividade pesqueira como uma importante fonte de renda e que

ficam vulneráveis à atuação de agentes externos, como vendedores de gelo e compradores de peixe.

Além disso, em lugares onde não existe energia elétrica, certas práticas comuns, como beber água gelada ou saborear uma sobremesa fria, são eventos que demandam as mais variadas estratégias por parte da população, que é obrigada a arcar com os custos da logística de suprimento do gelo. Os custos de mão de obra e de tempo, aliados aos gastos financeiros necessários para compra do gelo, das caixas de isopor e do combustível gasto no seu transporte, desde o local de produção até o local de consumo, tornam a busca pelo gelo difícil e custosa.

A Figura 5 ilustra os principais componentes de um sistema fotovoltaico para produção de gelo, composto por gerador fotovoltaico, quadro elétrico e máquina de gelo. A máquina de gelo está fora de escala para facilitar sua visualização.

Figura 5: Sistema fotovoltaico para produção de gelo.

A colocação de água nas bandejas é realizada de forma manual. Essa água deve ser tratada se o gelo produzido for para utilização na conservação de alimentos preparados que mantêm contato direto com o gelo ou para preparação de bebidas geladas. Se for para resfriamento de produtos dispostos em embalagens hermeticamente isoladas, não há necessidade do uso de água potável. Também não

há necessidade do tratamento prévio da água quando o gelo for produzido para manter o peixe conservado por mais tempo, antes do preparo ou da venda. Nesse caso pode ser utilizada água de rios, lagos ou igarapés.

Uma das aplicações da tecnologia fotovoltaica mais difundida no país são os Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares (SFDs). Tais sistemas são utilizados para provimento de eletricidade a residências não conectadas na rede elétrica convencional, situadas em locais onde a baixa densidade demográfica e a baixa demanda de eletricidade tornam inviável o investimento do setor elétrico na construção de novas centrais geradoras ou na extensão da rede.

A Figura 6 mostra um SFD típico, composto por gerador fotovoltaico, controlador de carga e inversor c.c./c.a. dentro de um quadro elétrico, baterias e equipamentos de uso final de energia dentro do domicílio.

Figura 6: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar.

Uma aplicação que ocupa lugar cada vez mais expressivo entre as aplicações da tecnologia fotovoltaica é a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede elétrica. A disseminação dessa aplicação teve início com o programa japonês de incentivos aos pequenos geradores fotovoltaicos conectados à rede, o “*PV Roofs*”, seguido por programas semelhantes em outros países que foram acompanhando essa tendência, primeiro Alemanha e Estados Unidos e depois Espanha, Holanda, Suíça e Austrália (ZILLES ET AL., 2012).

Com isso, em poucos anos, esse tipo de aplicação transformou-se no maior mercado da indústria fotovoltaica, pois em todos os países onde se implementou algum tipo de mecanismo de incentivo à disseminação desses sistemas, houve uma difusão real da geração distribuída com sistemas fotovoltaicos (ZILLES ET AL., 2012). Tal fato abre uma perspectiva para a utilização em larga escala da tecnologia fotovoltaica, contribuindo para a diversificação da matriz elétrica brasileira.

A figura 7 ilustra os principais componentes de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, composto por: gerador fotovoltaico, inversor c.c./c.a. e quadro elétrico para a conexão da saída do inversor c.c./c.a. com as instalações em corrente alternada da residência.

Figura 7: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica.

A figura 8 representa em linhas gerais algumas das fontes geradoras de eletricidade do sistema elétrico brasileiro, com o objetivo de mostrar as relações que envolvem a conexão de sistemas fotovoltaicos na rede elétrica convencional.

Figura 8: Representação da matriz elétrica brasileira.

Quando se conecta um sistema fotovoltaico à rede elétrica, como mostrado na figura 7, a energia produzida a partir do Sol é injetada no sistema elétrico e pode ser utilizada por qualquer consumidor nele conectado. Na situação descrita, a energia requerida pelas cargas seria fornecida por uma hidroelétrica ou termelétrica, caso não houvesse o sistema fotovoltaico. Ao evitar que se consuma água do reservatório de hidroelétricas ou gás de termelétricas, a energia solar fotovoltaica colabora para a preservação de energia primária do sistema elétrico, atuando de maneira complementar às fontes já existentes.

A rede elétrica atua então como uma espécie de acumulador de energia, permitindo o armazenamento de fontes primárias e priorizando a injeção da energia vinda do Sol ao sistema elétrico. Durante a noite, por exemplo, o domicílio que contribuiu com a geração fotovoltaica durante o dia pode recorrer ao sistema elétrico para utilizar a energia acumulada nas fontes primárias.

Outra aplicação da energia solar fotovoltaica são os denominados sistemas híbridos, que utilizam duas ou mais fontes primárias de energia, permitindo a otimização dos recursos energéticos disponíveis. As configurações mais utilizadas são solar-diesel, eólico-diesel e solar-eólico-diesel. A distribuição da energia elétrica gerada é realizada por meio de uma minirrede até os domicílios.

A utilização de geradores a diesel com minirredes de distribuição de energia elétrica é uma opção bastante difundida em comunidades isoladas da rede elétrica convencional. Os subsídios dados ao diesel e o fácil acesso aos geradores, aliados a estratégias políticas de eletrificação de comunidades com doação periódica de diesel, contribuem para a difusão desse tipo de eletrificação. A utilização de sistemas híbridos, com inserção da energia solar fotovoltaica nestas comunidades, possibilita a redução da dependência política e da poluição.

A Figura 9 ilustra os principais componentes de um sistema híbrido de energia, composto por: geradores fotovoltaicos, inversores c.c./c.a. de conexão à rede elétrica, controladores de carga, baterias, inversores c.c./c.a. bidirecionais, gerador a diesel e quadros elétricos.

Figura 9: Sistema híbrido para geração de energia elétrica.

Como visto até este ponto, as aplicações fotovoltaicas utilizam equipamentos com conteúdos tecnológicos distintos. A tecnologia empregada para fabricação das baterias, por exemplo, remonta aos tempos de Alessandro Volta (1745-1827), que no ano de 1799 construiu a primeira pilha elétrica, antepassada distante das baterias eletroquímicas utilizadas até hoje em sistemas fotovoltaicos.

As tecnologias envolvidas em equipamentos condicionadores de potência estão diretamente relacionadas ao desenvolvimento da área de eletrônica e microeletrônica ocorrido no século XX. As gerações desses equipamentos foram surgindo à medida que a eletrônica de potência progredia, passando de analógica para digital e desta para a microeletrônica. O resultado é que no decorrer deste processo esses equipamentos tornaram-se mais eficientes e compactos.

A descoberta do efeito fotoelétrico data de 1839, como dito anteriormente; no entanto, a tecnologia necessária para fabricar, interconectar e encapsular células fotovoltaicas para formarem módulos fotovoltaicos é bem mais recente e data da década de 1960.

A utilização da energia solar fotovoltaica somente é possível atualmente graças à evolução do conhecimento científico e ao desenvolvimento tecnológico ocorrido neste percurso histórico. Esses progressos levaram ao desenvolvimento, por exemplo, de módulos fotovoltaicos com tempo de vida de 25 anos e eficiência cada vez melhor. Nota-se que o cabedal de saberes sobre energia solar fotovoltaica é diverso e extenso, envolvendo radiação solar, geometria Sol-Terra, interações quânticas entre fótons e elétrons e princípios de eletricidade.

O aprendizado de tais conceitos constitui requisito fundamental para a formação de profissionais qualificados para implantação da tecnologia. Outros conhecimentos requeridos estão relacionados às obras civis para montagem das estruturas de fixação dos módulos fotovoltaicos e para construção dos abrigos para os equipamentos de condicionamento de potência, bem como aos princípios de hidráulica para conexão das tubulações de água e construção da estrutura de sustentação da caixa de água para os sistemas de bombeamento e tratamento de água.

1.2. Panorama mundial

A tendência mundial é a busca por novas fontes de energia que possam atender ao acelerado crescimento da demanda de forma não poluente e sustentável. O mercado de energia solar fotovoltaica teve um grande crescimento

nos últimos anos em diversos países, impulsionado pela criação de programas governamentais de incentivos fiscais, que obrigam a compra de energia elétrica por parte das concessionárias, atraindo investidores que fomentam a melhoria da eficiência dos equipamentos e a redução dos custos dos componentes.

A Alemanha, o Japão, os Estados Unidos e a Espanha são países com grande potência acumulada instalada de sistemas fotovoltaicos. O pano de fundo para os níveis de crescimento experimentados por estes países são os programas governamentais de incentivos, que aumentaram a participação dos sistemas fotovoltaicos na geração de energia elétrica por meio de subsídios e incentivos à indústria de equipamentos fotovoltaicos para barateamento da tecnologia. As principais motivações de tais programas são a necessidade de se adotar um modelo energético sustentável e ambientalmente correto, mas, apesar de motivados por questões comuns, cada país adotou sua própria linha de incentivo.

Uma das iniciativas mais bem sucedidas, segundo relatório já citado da ABINEE, é o caso da tarifa prêmio. Utilizado em vários países do mundo, esse mecanismo consiste em um pagamento diferenciado por MWh produzido, conforme o custo de geração de cada energia. Como a energia fotovoltaica tem um valor mais alto de produção, os produtores recebem um valor diferenciado, que no longo prazo diminui, para incentivar a redução dos custos com o tempo.

A Alemanha é um dos países em que esse procedimento mais mostrou resultados. Não à toa, em 2010, o país germânico adicionou mais produção fotovoltaica em sua matriz energética do que o mundo todo no ano anterior, segundo dados do *Global Status Report* em energia renovável do ano de 2011. O governo alemão aprovou uma lei para contornar a dificuldade imposta pela diferença de preços entre os energéticos renováveis e os convencionais, cujo objetivo é promover o desenvolvimento sustentável do fornecimento de energia no país.

Exemplos de aplicações fotovoltaicas espalham-se cada vez mais pelo planeta, demonstrando que a tecnologia deve participar progressivamente na diversificação dos recursos presentes na matriz energética mundial. Itália e Espanha são exemplos de países que ampliaram o uso de energia fotovoltaica. O bloco europeu é responsável pela maior parte da produção mundial de energia

elétrica provinda de fonte fotovoltaica. Em seguida estão o Japão, Estados Unidos e China.

É interessante ressaltar que a irradiação solar dos melhores parques fotovoltaicos da Alemanha é inferior à dos locais de menor irradiação brasileiros (ABINEE, 2012). Isso demonstra que em qualquer localidade do Brasil, que tem uma das melhores irradiações solares do mundo em razão de sua localização geográfica, é possível transformar a energia fotovoltaica em produção de escala, competindo em pé de igualdade com outras fontes energéticas.

1.3. Cenário brasileiro

O setor elétrico brasileiro se destaca internacionalmente pela grande participação de fontes renováveis. De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2013, a participação das renováveis na produção de energia elétrica foi de 84,5%, especialmente por causa da participação das usinas hidroelétricas. Apesar desta característica já ser um fator positivo para o país, ainda emite-se anualmente 429 milhões de toneladas de CO₂.

Embora esse índice seja considerado baixo para os padrões mundiais, o Brasil pode melhorá-lo ao aproveitar a vantagem de possuir muitos recursos energéticos renováveis ainda pouco explorados e ao buscar constantemente uma independência com relação aos combustíveis fósseis, promovendo, desta forma, um crescimento mais sustentável e ambientalmente correto.

No entanto, enquanto o mundo assiste a “uma corrida mundial para levar ao mercado tecnologias inovadoras que poderiam reduzir as emissões de gases poluentes”², o Governo Brasileiro celebra a descoberta do pré-sal, cuja exploração dobraria as emissões nacionais de CO₂ verificadas atualmente, segundo mostram dados do relatório do Greenpeace citado anteriormente. Esse acréscimo deixaria o Brasil entre os três maiores emissores do mundo, atrás apenas de China e Estados

² REUTERS. TI verde será revolução maior que web. Info on-line. **Plantão Info**, mai.2007. Disponível em: <<http://info.abril.com.br/aberto/infonews/052007/15052007-11.shl>>. Acesso em: 21 dez. 2013.

Unidos. Além disso, é preciso considerar o histórico de danos provocados ao meio ambiente em casos de vazamentos de petróleo.

As controvérsias com relação à geração de energia por meio de usinas hidroelétricas devem ser igualmente consideradas. Estudos mostram que algumas dessas usinas emitem mais gases de efeito estufa, ou na mesma proporção, que usinas a carvão mineral. Além disso, o processo de apodrecimento da mata encoberta pela água na construção das barragens acidifica a água e emite metano, gás também causador do efeito estufa. Os problemas sociais, ambientais e econômicos decorrentes, como as questões das populações que são expulsas ou prejudicadas, são outro fator a ser considerado. Ainda existe o problema da distância entre o local da hidroelétrica e o mercado consumidor, o que significa mais custos financeiros, perdas elétricas e possíveis danos ao meio ambiente na construção de linhas de transmissão.

O país poderia se destacar entre os países que utilizam matrizes energéticas consideradas limpas, ao investir mais na energia fotovoltaica, tendo em vista o grande potencial do país, com grande radiação solar e abundância de matéria-prima essencial para produção do Silício, utilizado na fabricação das células fotovoltaicas e equipamentos de condicionamento de potência. Há que se ressaltar a forte interação com a cadeia de valor da indústria de componentes eletrônicos, sobretudo semicondutores, a partir da cadeia de purificação do Silício. Neste sentido, o Brasil pode reunir condições competitivas para abrigar investimentos nessa cadeia, de forma a atender a ambos os mercados: solar fotovoltaico e de componentes eletrônicos.

A tecnologia fotovoltaica é madura, confiável e tecnicamente viável. No entanto, a falta de um mercado consolidado no país faz seu custo de geração ainda ser alto em comparação aos valores médios praticados no mercado elétrico nacional, embora sua utilização possa resultar em uma série de benefícios. Esse caso coloca em evidência a distorção na forma de se planejar a expansão do setor elétrico, ao utilizar como parâmetro mais importante o custo de geração, sem levar em conta benefícios não mensuráveis, o que coloca em vantagem as fontes cujos danos não sejam financeiramente quantificáveis (OLIVEIRA, 2002).

Assim, se em âmbito internacional o panorama do uso de energia solar fotovoltaica é favorável, no Brasil o campo de atuação ainda é restrito, estando mais difundidas as aplicações desse tipo de energia para eletrificação rural e para bombeamento de água, mostrando que o país ainda não está preparado para atingir o patamar de desenvolvimento que outros países já alcançaram, por falta de uma política que incentive o uso de energias renováveis.

Apesar da falta de incentivos e de políticas públicas que estimulem a disseminação de sistemas fotovoltaicos, o prognóstico aponta para o fato de haver interesse de empresas e instituições no desenvolvimento do setor e na difusão do uso de sistemas fotovoltaicos, principalmente sua aplicação em centros urbanos, o que permitiria atingir maior parte da população.

Aliado a este interesse, a expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil apresenta avanços principalmente nas esferas da regulamentação e da normatização. Destacam-se neste contexto a atuação da ANEEL, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), cujos esforços para publicação de resoluções, normas técnicas e portarias trouxeram regras claras para as concessionárias de energia e garantias técnicas e comerciais para os consumidores, promovendo um cenário de segurança jurídica para investidores.

A trajetória de aumento de eficiência e queda dos custos de implantação de sistemas fotovoltaicos em nível internacional contribui igualmente para aumentar a potencialidade de implantação efetiva no Brasil. Espera-se que a queda de preços deixe para trás a barreira econômica para o uso de sistemas solares pelo lado da demanda, diminuindo os entraves econômicos a curto e médio prazo.

Para enfrentar os desafios relacionados à inserção da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira, algumas organizações estão se estruturando e preocupando-se em apresentar propostas para competitividade e sustentabilidade do setor. Entre elas, encontra-se *Energia solar fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão*, elaborada pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2010). Entre os principais itens apresentados na proposta estão o incentivo à pesquisa e à inovação tecnológica, a criação de um mercado consumidor e o estabelecimento de indústrias de Silício grau solar e grau

eletrônico, de células solares e de módulos fotovoltaicos. Cabe enfatizar que as diretrizes contidas nesse documento demandam direta ou indiretamente profissionais especializados em energia solar fotovoltaica.

O Governo Brasileiro, por meio do Ministério de Minas e Energia, criou um Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) para aumentar a participação de fontes alternativas na matriz energética do país. O PROINFA contempla a produção energética por meio de pequenas centrais hidroelétricas, de energia eólica e de biomassa. Esse programa impulsionou empreendimentos desses tipos no país, incentivou a indústria de base dessas fontes e diversificou a matriz energética brasileira. Entre as principais alternativas aos combustíveis fósseis, apenas a energia solar não foi contemplada.

Segundo o documento “Carta do Sol”, produzido por pesquisadores e consultores do Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente (LIMA), Programa de Planejamento Energético (COPPE) e Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), a justificativa para a ausência da energia fotovoltaica no PROINFA foi “[...] que o seu preço ainda era alto demais. Dessa forma, esta fonte foi adotada somente no âmbito do Programa Luz para Todos (LpT), ficando restrita ao atendimento de domicílios isolados, com potências instaladas e volumes de encomendas reduzidos, notadamente insuficientes para permitir uma dinâmica de inovação e o desenvolvimento no país da cadeia produtiva fotovoltaica, capazes de proporcionar redução de custos” (ROVERE, 2011).

Há que se ressaltar que o PROINFA foi regulamentado em 2004, antes do crescimento mundial em pesquisa e investimento tecnológico na energia fotovoltaica, ocorrido entre 2005 e 2013, e que provocou, como já dito, uma queda nos custos dos empreendimentos. Apesar disso, a tecnologia fotovoltaica ainda não é competitiva com a rede elétrica, exceto em casos como sistemas para locais isolados ou localizados em centros urbanos com altos índices de radiação e preço da tarifa elétrica elevado.

Os sistemas fotovoltaicos do tipo conectados à rede têm ganhado importância devido à sua potencial competitividade no futuro, associada com facilidades como modularidade e integração à arquitetura da edificação. Além disso, a geração descentralizada promove um consumo mais eficiente da eletricidade, pois evita o

desperdício na transmissão e distribuição de energia por meio de longas linhas desde as usinas hidroelétricas e termelétricas até os principais locais de consumo.

Em face dos benefícios e das barreiras encontradas para a expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil, os signatários do relatório *Carta do Sol* propõem alguns subsídios para o planejamento da promoção da energia solar fotovoltaica, entre eles a necessidade de fomentar programas de capacitação e formação de recursos humanos para atuar em todas as etapas da cadeia produtiva da energia solar fotovoltaica (ROVERE, 2011).

Cabe mencionar que está se desenvolvendo capacitação tecnológica para fabricação de células e módulos fotovoltaicos no país. A Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS) possui uma planta piloto em operação e depende de um mercado consumidor para aumentar a escala de produção. O Brasil também possui fábricas de acumuladores e de inversores, que podem ser adaptados para atender às especificações dos sistemas solares fotovoltaicos.

Há ainda a necessidade do crescimento da demanda por parte da sociedade. Nesse sentido, quanto mais os cidadãos forem conscientes e exigirem uma política pública de energia alternativa, com menores impactos sociais e ambientais, mais rapidamente esse conhecimento será disseminado.

2. Capacitação de estrutura laboratorial

Este capítulo aborda os requisitos necessários para a estruturação de laboratórios especializados em sistemas fotovoltaicos, baseado na descrição dos materiais, ferramentas, instrumentos e procedimentos utilizados na implantação dos sistemas que compõem a Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP. O objetivo é socializar todo o conhecimento produzido na constituição de tal Unidade, propondo uma reflexão sobre as metodologias utilizadas para gestão do conhecimento científico.

A tecnologia é uma aplicação do conhecimento científico para especificar as vias de se fazerem as coisas de uma maneira reproduzível (CASTELLS, 1999), ou seja, é um produto da ciência que envolve um conjunto de instrumentos e métodos que visam à resolução de problemas na prática. Ela é vista neste trabalho como um processo social, no qual a técnica é apenas um dos fatores, sendo os indivíduos partes integrantes desse processo, não apenas como inventores e operadores, mas como elementos que direcionam sua aplicação (MARCUSE, 1999).

Um conceito que vem ganhando espaço nas discussões sobre desenvolvimento tecnológico, social e econômico é o da gestão do conhecimento. De acordo com tal conceito, uma nova tecnologia somente obtém êxito se houver a difusão do conhecimento produzido em âmbito acadêmico para outros setores da sociedade. A transmissão de um conhecimento técnico para a sociedade é, então, um aspecto chave para o processo de desenvolvimento da tecnologia.

O conhecimento da tecnologia fotovoltaica no país ainda é restrito a alguns especialistas e partes diretamente interessadas, necessitando a adoção de ações de disseminação da informação e sensibilização dos setores acadêmico, produtivo e governamental. Para que o conhecimento seja disseminado, devem existir estratégias adequadas à realidade dos institutos de pesquisa, para que integrem produção do conhecimento científico com apropriação social dos resultados, incluindo o atendimento de demandas comerciais de empresas de sua cadeia de valor, ou seja, é necessário um modelo de difusão tecnológica que promova a

transferência dos conhecimentos, combinando demandas comerciais e sociais com resultados de pesquisas (ADES, 2013).

Quando se tenta transformar um instituto de pesquisa em um local não apenas de produção do conhecimento, mas também de transmissão da informação, encontram-se alguns obstáculos. Um deles é a necessidade de qualificação de profissionais para transferência da tecnologia, pois muitos investimentos em pesquisa e desenvolvimento do setor de energia solar fotovoltaica são inibidos pela escassez de recursos humanos qualificados. Justamente a esse gargalo que também se refere este estudo. Assim, para que o círculo virtuoso da geração e difusão do conhecimento ocorra deve-se considerar investimentos em capacitação de estrutura e qualificação de profissionais.

Este então seria um dos pilares da Unidade de Capacitação: ser um canal direto para potencializar resultados de transferência de tecnologia e apropriação social do saber, com uma estrutura específica para facilitar a produção e a difusão do conhecimento científico na linguagem que cada público requer, por meio da divulgação do conhecimento com programas de ensino, publicações e ações educacionais.

Institutos de pesquisa e universidades desempenham um importante papel de estímulo à criação do conhecimento e na aplicação da ciência. Segundo a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, 2008), a distribuição do investimento em pesquisa e desenvolvimento no Estado de São Paulo, mais importante pólo de desenvolvimento do país, foi de 62% por parte de empresas, 37% por parte de Instituições de Ensino Superior (IES) públicas e agências de fomento públicas, tanto estaduais como federais, e 1% de IES privadas.

Tais investimentos estão relacionados com a dimensão política, que provê os recursos que são utilizados para alcançar os resultados desejados, atendendo às necessidades das partes envolvidas: pesquisadores, ao darem continuidade às suas pesquisas; universidades, ao produzirem; governo, ao fortalecer sua imagem como país inovador; sociedade, beneficiada com novos produtos e serviços; e empresas, com o aumento da competitividade (ADES, 2013).

Instituições de pesquisa, com adequadas competências estratégicas e organizacionais, possuem papel determinante na criação de estruturas que sirvam

de referência e abram caminho para que o governo e empresas possam investir no desenvolvimento tecnológico, tornando mais eficiente a captação de recursos (ADES, 2013). A estrutura descrita a seguir está sendo utilizada por este estudo como uma unidade exemplar para capacitação laboratorial e qualificação profissional.

2.1. Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP

A estrutura do LSF-IEE-USP é composta por laboratórios para ensaios em equipamentos usados em aplicações da tecnologia fotovoltaica e por um campo de provas para ensaios em sistemas fotovoltaicos. Os equipamentos, sistemas, metodologias e procedimentos de instalação e gestão de sistemas fotovoltaicos utilizados pelos referidos laboratórios vêm sendo utilizados com o objetivo de constituir uma Unidade de Capacitação Tecnológica para qualificação de recursos humanos em energia solar fotovoltaica.

Essa Unidade foi concebida alinhada com conceitos que vão além da transferência de conhecimentos meramente técnicos. A proposta dessa unidade integra o tripé ensino, pesquisa e extensão, possibilitando o cumprimento das principais atribuições do ensino superior estabelecidas pela Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB), quais sejam: formar profissionais capacitados ao desenvolvimento das atividades profissionais; desenvolver a pesquisa; articular a formação com a realidade social vivida no país; desenvolver a extensão, abrindo a possibilidade de acesso ao conhecimento produzido nas instituições de ensino superior à população em geral.

A proposta foi construída baseada na experiência acumulada em 18 anos de trabalho do LSF-IEE-USP, dirigido ao desenvolvimento de pesquisas por diversos profissionais e execução de trabalhos de campo em diferentes populações, podendo contribuir para a formação de profissionais com uma visão concreta e consciente das questões sociais e ambientais envolvidas na geração de eletricidade por meio da energia solar.

Com o passar do tempo, somaram-se esforços para consolidar uma estrutura física e de recursos humanos que permite a acumulação e difusão de saberes práticos junto à sociedade, por meio de projetos de eletrificação de comunidades isoladas geograficamente, atuando na qualificação de usuários e técnicos locais. Esse tipo de vivência, somado às experiências em cursos e treinamento nas dependências do LSF, contribuiu para o aprimoramento contínuo do processo de capacitação.

Portanto, a Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP surgiu de experiências acumuladas, que foram ganhando novas formatações em virtude das evoluções da tecnologia e da regulamentação do mercado, tornando-se cada vez mais articulada com outros centros de referência em pesquisa e ensino no Brasil e no exterior e incorporando novas aplicações fotovoltaicas em sua estrutura laboratorial.

A apresentação do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos permite conhecer com mais clareza as partes constituintes da referida Unidade, para que se identifiquem elementos relevantes para a formação de profissionais especializados em sistemas fotovoltaicos, vinculado com uma política de qualificação profissional.

O LSF foi fundado em 1995 pelo professor Roberto Zilles e desde então atua em atividades de ensino, pesquisa acadêmica e extensão universitária no âmbito do Programa de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo (PPGE). Entre suas atividades está o desenvolvimento de protótipos para sistemas de condicionamento de potência e a realização de ensaios de conformidade em equipamentos para uso em aplicações da tecnologia fotovoltaica.

As atividades de ensino desenvolvidas são compostas por aulas teóricas e práticas, próprias à formação de alunos de graduação e pós-graduação da USP, uma vez que possibilitam aos estudantes o contato direto com um universo representativo das principais aplicações da energia solar fotovoltaica. A estrutura laboratorial contribuiu, ao longo de sua história, para a produção de 9 teses de doutorado e 20 dissertações de mestrado e apoiou diversos alunos de graduação, pesquisadores e pós-doutorandos no desenvolvimento de suas atividades de pesquisa.

As pesquisas realizadas conduziram ao desenvolvimento de protótipos de sistemas fotovoltaicos para aplicação em projetos pilotos e contribuíram para a criação de uma estrutura laboratorial para ensaios em equipamentos e sistemas fotovoltaicos. A automação da bancada para ensaios em inversores c.c./c.a. e controladores de carga e a implementação de outras bancadas para avaliação de sistemas fotovoltaicos completos, tais como os usados para bombeamento e dessalinização de água e para produção de gelo, são alguns exemplos de protótipos concebidos.

Os laboratórios são utilizados, desde 2006, para a realização de ensaios de conformidade no âmbito do Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO. Este programa estabelece, por meio da portaria INMETRO 004/2011, os requisitos necessários para a execução de ensaios em equipamentos utilizados nas aplicações fotovoltaicas. Em 2013 tornou-se o primeiro laboratório acreditado pelo INMETRO, no escopo da norma ISO/IEC 17025 – Requerimentos Gerais para Laboratórios de Ensaio e Calibração – para testes em equipamentos fotovoltaicos no Brasil.

Os referidos ensaios para avaliação de conformidade ocorrem sob demanda de fabricantes, empresas de comércio de equipamentos e integradores de sistemas fotovoltaicos e enquadram-se como atividades de extensão universitária, uma vez que a prestação de serviços na forma de testes laboratoriais constitui uma forma de interação entre universidade e sociedade.

A participação em projetos de eletrificação e fornecimento de água utilizando a energia solar fotovoltaica em comunidades remotas está entre as atividades de extensão universitária que resultaram em significativa melhoria na qualidade de vida destas populações.

As atividades de pesquisa e extensão são disseminadas também sob outras formas, tais como: publicação de artigos técnicos em congressos e revistas científicas; organização de seminários temáticos com a participação de especialistas; divulgação pela *internet* de apresentações relacionadas à tecnologia fotovoltaica; entrevistas para emissoras de rádio e televisão; visitas técnicas guiadas nas dependências dos laboratórios para estudantes do ensino médio e

público em geral; e página eletrônica com as informações e documentos necessários para o processo de etiquetagem de equipamentos fotovoltaicos.

Atentos às pesquisas realizadas em âmbito internacional, os pesquisadores do LSF-IEE-USP mantêm contato frequente com pesquisadores de outros países, por intermédio de programas de cooperação institucional, seminários para difusão de experiências de transferência da tecnologia fotovoltaica, estágios de curta e longa duração em instituições estrangeiras, visitas a instalações fotovoltaicas no exterior e acolhimento de pesquisadores e estudantes de outros países em suas dependências.

A estrutura física representada na Figura 10 foi construída com a contribuição de inúmeros pesquisadores, estudantes e profissionais de diversas áreas do conhecimento, para o desenvolvimento das atividades de ensino, pesquisa e extensão descritas nos parágrafos anteriores. Tal estrutura é composta por laboratórios para testes em equipamentos, campo de prova para ensaios em diferentes aplicações de sistemas fotovoltaicos e sala de treinamento.

Figura 10: Representação da estrutura física do LSF-IEE-USP.

A fotografia da Figura 11 mostra o laboratório do LSF-IEE-USP para ensaio em módulos fotovoltaicos, controladores de carga e descarga e inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos com baterias.

Figura 11: Laboratório para ensaios em equipamentos de sistemas fotovoltaicos isolados – foto.

A ilustração da figura 12 representa uma planta baixa do laboratório que contém o simulador solar do IEE-USP e as bancadas para testes em equipamentos fotovoltaicos utilizados em sistemas isolados da rede elétrica convencional.

Figura 12: Laboratório para ensaios em equipamentos de sistemas fotovoltaicos isolados.

A foto da Figura 13 mostra a estrutura laboratorial para testes em inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Figura 13: Laboratório para ensaios em equipamentos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica – foto.

O desenho da Figura 14 mostra a representação de uma vista superior do laboratório do LSF-IEE-USP para testes em equipamentos utilizados em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica convencional.

Figura 14: Laboratório para ensaios em equipamentos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

A Figura 15 mostra uma fotografia do campo de prova do LSF-IEE-USP para testes em sistemas fotovoltaicos usados para bombeamento e tratamento de água, produção de gelo e eletrificação domiciliar isolada e conectada à rede elétrica.

Figura 15: Campo de prova para ensaios em sistemas fotovoltaicos – foto 1.

A foto da Figura 16 mostra o campo de prova para testes em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Da esquerda para direita, tem-se uma central fotovoltaica de 150 kWp instalada sobre terreno, um sistema fotovoltaico de 12,5 kWp na fachada, uma instalação de 75 kWp sobre telhado e uma montagem de 150 kWp em forma de estacionamento que ainda está em construção.

Figura 16: Campo de prova para ensaios em sistemas fotovoltaicos – foto 2.

O desenho da Figura 17 ilustra a estrutura laboratorial empregada para realização de testes em sistemas fotovoltaicos e qualificação de recursos humanos.

Figura 17: Campo de prova para ensaios em sistemas fotovoltaicos – representação.

A foto da Figura 18 mostra uma sala de treinamento do LSF-IEE-USP, utilizada para aulas teóricas e práticas sobre as aplicações da energia solar fotovoltaica.

Figura 18: Sala de treinamento em sistemas fotovoltaicos – foto.

A Figura 19 é uma representação da vista superior da estrutura laboratorial do LSF-IEE-USP, usada para pesquisas e formação de profissionais no segmento fotovoltaico. Encontra-se nesse desenho a sala de treinamento na qual se ministram aulas teóricas e práticas sobre as aplicações da tecnologia solar fotovoltaica.

Figura 19: Sala de treinamento em sistemas fotovoltaicos – representação.

As seções que seguem detalham essa estrutura laboratorial, utilizada para a realização dos ensaios em equipamentos e sistemas fotovoltaicos. Além disso, são descritos os diferentes sistemas fotovoltaicos para bombeamento e tratamento de água, produção de gelo, eletrificação domiciliar isolada e conectada à rede elétrica e energização de comunidades e demandas autônomas de energia. Por fim, são relatadas algumas experiências de formação de recursos humanos.

2.2. Acreditação de laboratório para ensaios

A instalação de sistemas fotovoltaicos tem sido favorecida por leis e resoluções que estabelecem condições e procedimentos para fornecimento de energia elétrica por meio de tais sistemas. Entre as determinações legais, há uma na qual os componentes dos sistemas fotovoltaicos devem ser submetidos a ensaios de aceitação e qualificação realizados pelo Programa Brasileiro de

Etiquetagem (PBE) do INMETRO, reconhecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para verificação da conformidade técnica desses componentes.

O regulamento específico do PBE para etiquetagem de componentes de sistemas fotovoltaicos aplica-se ao módulo fotovoltaico, ao controlador de carga e descarga, ao inversor c.c./c.a. para sistemas isolados, ao inversor c.c./c.a. para sistemas conectados à rede elétrica e à bateria. O PBE, por meio da portaria INMETRO 004/2011, também elaborou um regulamento específico para o uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia Elétrica (ENCE) em sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica. A ENCE tem por objetivo transmitir aos consumidores informações úteis relativas aos produtos que pretendem adquirir.

Os procedimentos de qualificação e aceitação utilizados pelo PBE do INMETRO visam, do ponto de vista da tecnologia, garantir maior confiabilidade e robustez aos sistemas fotovoltaicos e, do ponto de vista dos usuários finais, provê-los de informações que lhes permitam avaliar a eficiência dos equipamentos utilizados para energia solar.

No LSF, é possível realizar ensaios em módulos fotovoltaicos, controladores de carga e descarga, inversores c.c./c.a. para sistemas isolados e inversores c.c./c.a. para sistemas conectados à rede elétrica. Os testes são realizados em ambiente acreditado, ou seja, no qual os procedimentos organizacionais e estruturais cumprem o exigido pela ABNT por meio da norma ISO/IEC 17025. Para os ensaios em equipamentos fotovoltaicos, a descrição segue o estabelecido pela portaria INMETRO 004/2011 e para os ensaios em sistemas fotovoltaicos utilizam-se procedimentos próprios de medida, uma vez que o INMETRO ainda não definiu a sequência de testes para certificação do sistema fotovoltaico como um todo.

Tais testes, que analisam o funcionamento global de um sistema fotovoltaico, denominam-se ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética. Tal análise considera todos os seus elementos conectados entre si: gerador fotovoltaico, equipamento para condicionamento de potência, equipamento de uso final, condutores, quadro elétrico e elementos de seccionamento e proteção.

A medição das variáveis atmosféricas relevantes para os testes em equipamentos e para os ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética em sistemas fotovoltaicos é realizada por uma estação meteorológica que mede

algumas variáveis como irradiância global e difusa, temperatura ambiente, umidade relativa, velocidade e direção do vento.

As fotos da figura 20 mostram os componentes da estação meteorológica do LSF-IEE-USP.

Figura 20: Estação meteorológica do LSF-IEE-USP.

Essa estação meteorológica é composta por três piranômetros, um anel de sombreamento, uma sonda para medição de temperatura e umidade, um registrador de dados e um módulo fotovoltaico acoplado a uma bateria para fornecimento de energia elétrica para o conjunto. A Tabela 1 descreve o conjunto de variáveis medidas por essa estação.

Tabela 1: Conjunto das variáveis medidas pela estação meteorológica do LSF-IEE-USP.

Variável	Unidade	Equipamento de medição	Precisão
Irradiação global no plano horizontal	Wh/m ²	Piranômetro instalado no plano horizontal.	$\pm 0,05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$

Irradiação global no plano inclinado	Wh/m ²	Piranômetro instalado no plano inclinado.	$\pm 0,05 \mu\text{V}/\text{W.m}^{-2}$
Irradiação difusa no plano horizontal	Wh/m ²	Piranômetro instalado no plano horizontal com anel de sombreamento.	$\pm 0,05 \mu\text{V}/\text{W.m}^{-2}$
Temperatura ambiente	Graus Celsius (°C)	Sonda de temperatura	$\pm 0,1 ^\circ\text{C}$
Umidade	Umidade relativa (%)	Sonda de umidade	$\pm 1 \%$
Velocidade do vento	m/s	Anemômetro	$\pm 0,5 \text{ m/s}$
Direção do vento	Ângulo	Sensor de direção	$\pm 5 ^\circ$

Os próximos parágrafos discorrem sobre os ensaios propriamente ditos e sobre a instrumentação utilizada para a execução dos procedimentos de testes nesses equipamentos. A descrição tem início com os ensaios em módulos fotovoltaicos, compreende os testes em controladores de carga e descarga e inversores c.c./c.a. para sistemas isolados e finaliza com os testes em inversores c.c./c.a. para conexão à rede elétrica.

Os procedimentos para ensaios de módulos fotovoltaicos estão baseados nos três primeiros itens da norma IEC 61215 (*Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic Modules - Design Qualification and Type Approval*). Para a execução dos ensaios são necessários dois módulos fotovoltaicos do mesmo modelo, selecionados aleatoriamente dos depósitos dos fabricantes/fornecedores. A sequência de ensaios inicia com um tratamento prévio de 5 kWh/m² seguido por testes de inspeção visual, determinação da máxima potência e isolamento elétrico.

A Tabela 2 apresenta a relação dos ensaios em módulos fotovoltaicos exigidos pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO.

Tabela 2: Ensaios de etiquetagem para módulos fotovoltaicos.

Ensaio	Descrição
Verificação inicial	Realizar inspeção visual no módulo fotovoltaico e verificar se as informações do manual de operação conferem com as existentes na placa de identificação do equipamento.
Pré-condicionamento	Expor o módulo fotovoltaico em circuito aberto a um nível de irradiação entre 5 kWh/m ² e 5,5

	kWh/m ² .
Inspeção visual após pré-condicionamento	Verificar se, após a exposição, o módulo fotovoltaico não sofreu nenhuma alteração visual.
Determinação da máxima potência	Determinação do ponto de máxima potência do módulo nas condições padrão de ensaio (STC).
Isolamento elétrico	Determinação do nível de isolamento elétrico entre os terminais positivo e negativo e a moldura do módulo fotovoltaico.

Para a realização do ensaio de pré-condicionamento, cada módulo fotovoltaico é exposto ao ar livre juntamente com um instrumento de medição, cuja função é mensurar a quantidade de energia solar incidente no módulo sob teste. Existem diferentes tipos de instrumentos de medição para quantificar a energia da radiação solar. Na Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP esta função é realizada pelo piranômetro marca Kipp & Zonen, modelo CM 11, montado em uma estrutura no mesmo plano que o módulo sob ensaio, como mostrado na Figura 21.

Figura 21: Ensaio em módulo fotovoltaico – pré-condicionamento.

O ensaio de inspeção visual analisa os aspectos construtivos dos módulos fotovoltaicos, observando situações como: superfícies externas defeituosas; células quebradas, desalinhadas, tocando-se entre si ou em contato com a moldura do

módulo; interconexões entre células com defeitos; surgimento de bolhas ou delaminações; má vedação entre moldura e vidro; terminais elétricos defeituosos ou partes elétricas expostas; outras condições que possam afetar o desempenho da amostra sob teste. Para execução desses procedimentos de observação, a norma IEC 61215 exige um nível de iluminação superior a 1.000 lux, sendo necessário, portanto, o uso de um luxímetro para aferir esse nível no momento da inspeção visual. As fotos da Figura 22 mostram um técnico verificando o nível de iluminação com um luxímetro e realizando a inspeção visual.

Figura 22: Ensaio em módulo fotovoltaico – inspeção visual.

Para a execução dos procedimentos que determinam a máxima potência elétrica de módulos fotovoltaicos, faz-se necessário o estabelecimento de certas condições padronizadas, denominadas na literatura como condições-padrão de teste. Estas condições são definidas por normas internacionais e tratam da composição espectral da radiação utilizada na medição, da intensidade desta radiação e da temperatura das células fotovoltaicas no momento da medida. Os valores padronizados para as condições de medida são: espectro AM 1.5, irradiância 1.000 W/m^2 e temperatura das células fotovoltaicas de 25°C .

A portaria INMETRO 004/2011 permite a determinação da potência do módulo fotovoltaico por meio de medições realizadas em ambiente externo ou com simulador solar. Em ambas as situações, deve-se medir simultaneamente a tensão elétrica, a corrente elétrica, a irradiância e a temperatura, conforme estabelecido pela norma IEC 61215. Ao realizar essas medições é possível traçar uma curva tensão *versus* corrente, cujos pares ordenados são os valores de tensão e corrente elétrica medidos pelos instrumentos conectados ao módulo fotovoltaico sob teste.

Essa curva é referenciada na literatura como curva característica do módulo fotovoltaico e a sua análise é o ponto de partida para a realização de projetos envolvendo sistemas fotovoltaicos.

Na Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP, pode-se determinar a curva característica de um módulo fotovoltaico tanto por meio de instrumentos conectados ao módulo exposto a Sol real como através de um simulador solar do tipo *flash*, ou seja, de radiação solar simulada pulsada. A Figura 23 mostra um módulo fotovoltaico sob ensaio a Sol real e um piranômetro para verificação da irradiância no momento do teste.

Figura 23: Ensaio em módulo fotovoltaico –medição a Sol real.

A Figura 24 mostra a carga eletrônica marca PVE, modelo PVMP 1000C40, e os sensores de radiação e temperatura utilizados para medição de módulo fotovoltaico a Sol real no LSF-IEE-USP. Nesse ensaio, a carga eletrônica conectada no módulo sob teste faz com que ele funcione em todos os pontos de sua curva característica, do circuito aberto até curto-circuito. Durante essa polarização do módulo, o sensor de irradiância mede a energia solar incidente. Na foto, observam-se três diferentes sensores de irradiância usados para medição de diferentes tipos de módulos fotovoltaicos, dispostos da esquerda para a direita (filme fino, monocristalino e policristalino).

Figura 24: Ensaio em módulo fotovoltaico – carga eletrônica e sensores para medição a Sol real.

Para a realização do ensaio que determina a máxima potência do módulo fotovoltaico por meio de espectro simulado, utiliza-se um simulador solar de fabricação alemã, da empresa *OptoSolar*, modelo *Flashlight Simulator Sol 2x2m*. O termo simulador solar utilizado neste trabalho refere-se a um conjunto de componentes instalados apropriadamente em um laboratório climatizado, o qual possui uma sala escura com 7 metros de comprimento por 2,5 metros de largura e 2,5 metros de altura. Os componentes citados são: lâmpada *Xenon*, fonte de alimentação da lâmpada, célula de referência, transdutores de temperatura, computador e sistema de medição.

A figura 25 mostra, da esquerda para a direita, a fonte de alimentação da lâmpada *Xenon*, o computador de controle do ensaio, a fonte de tensão contínua para polarização do módulo fotovoltaico sob teste, o circuito que sincroniza a medida das variáveis com o *flash plateau* da lâmpada e a carga eletrônica que recebe os sinais de irradiância, temperatura, corrente e tensão elétrica vindos do experimento montado na sala escura mostrada na figura 26.

Figura 25: Ensaio em módulo fotovoltaico – simulador solar do LSF-IEE-USP.

A foto da Figura 26 mostra uma vista interna da sala escura a partir da porta. Ao fundo, nota-se a estrutura contendo a lâmpada *Xenon* e, em primeiro plano, tem-se o suporte para fixação do módulo fotovoltaico e da célula de referência, juntamente com as conexões para medição da irradiância, tensão do módulo, corrente do módulo, temperatura ambiente, temperatura do módulo e temperatura da célula de referência.

Figura 26: Ensaio em módulo fotovoltaico – sala escura do simulador solar.

A Figura 27 mostra a caixa metálica contendo o bulbo da lâmpada *Xenon* utilizada como fonte de luz no teste *indoor* de módulo fotovoltaico.

Figura 27: Ensaio em módulo fotovoltaico – lâmpada *Xenon* do simulador solar.

A Figura 28 mostra a estrutura de suporte para posicionamento do módulo fotovoltaico e da célula de referência no mesmo plano. Na foto aparecem quatro células de referência, o módulo fotovoltaico sob teste e um pequeno módulo fotovoltaico para sincronismo com o *flash* da lâmpada. Para ensaios de etiquetagem é necessário apenas uma célula de referência e o módulo a ser testado. A montagem mostrada na foto é realizada uma vez por ano no simulador solar do LSF-IEE-USP, para fins de comparação dos resultados obtidos pelo simulador solar com outros métodos de medida. Tal procedimento de verificação é exigido pelo INMETRO por meio da norma IEC 17025.

Figura 28: Ensaio em módulo fotovoltaico – estrutura de suporte para módulo e célula de referência do simulador solar.

O sistema de medição é composto por uma carga eletrônica e um conjunto de conversores analógico/digital de 12 bits que realizam a aquisição das variáveis. Os conversores recebem os sinais analógicos dos canais de entrada e transferem para o computador os respectivos valores digitais desses canais. Durante o *flash plateau*, a carga eletrônica mede simultaneamente os valores de corrente, tensão, irradiância e temperaturas, podendo-se, assim, determinar a curva característica do módulo fotovoltaico e o seu ponto de máxima potência.

As medições e a visualização dos resultados dos ensaios realizados no simulador solar são controladas por um microcomputador conectado a uma carga eletrônica. Por meio do *software* de operação do simulador é possível transferir a curva característica medida para as condições-padrão ou para qualquer outra condição de referência desejada. Tal correção da curva característica do módulo é realizada levando-se em conta a irradiância e as temperaturas do módulo, do ambiente e da célula de referência. Esses procedimentos de transferência dessa curva estão de acordo com a norma IEC 60891.

Após o conhecimento da máxima potência do módulo fotovoltaico, mede-se a largura e o comprimento do módulo fotovoltaico para determinação da sua área

externa. Com os valores da máxima potência e da área externa do módulo fotovoltaico, calcula-se a sua eficiência conforme definido na portaria INMETRO 004/2011. A Figura 29 mostra um exemplo de curva característica medida pelo simulador solar do LSF-IEE-USP e um exemplo da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) do INMETRO para módulo fotovoltaico.

Figura 29: Ensaio em módulo fotovoltaico – curva medida e etiqueta de eficiência do INMETRO.

Seguindo o ensaio, um módulo é separado como unidade de controle enquanto o outro segue para o teste da medição da resistência de isolamento, cujo objetivo é a determinação do nível de isolamento elétrico entre os terminais positivo e negativo e a moldura do módulo fotovoltaico. Para a realização deste ensaio, é necessário um equipamento que gere tensão elétrica na ordem de 3.000 V e que realize a medição da corrente elétrica que flui entre os terminais do módulo fotovoltaico e sua carcaça. Um equipamento adequado para realizar os testes citados chama-se megômetro. No LSF-IEE-USP, o equipamento utilizado para os testes de isolamento elétrico é o megômetro marca Fluke, modelo 1550B.

Na Figura 30, a foto exibida à esquerda mostra um técnico realizando ensaio de isolamento elétrico em um módulo fotovoltaico e a da direita mostra uma vista em detalhe do megômetro e da caixa de junção do módulo sob teste.

Figura 30: Ensaio em módulo fotovoltaico – isolamento elétrico.

Por fim, o módulo fotovoltaico é considerado aprovado nos respectivos ensaios se não houver evidência visual de um defeito importante, se a potência nas condições-padrão estiver entre -5 % e +10 % da potência nominal e se a resistência de isolamento atender aos requisitos da norma IEC 61215. A Tabela 3 mostra uma relação com todas as variáveis medidas durante a execução dos procedimentos exigidos para teste de módulos fotovoltaicos no âmbito da portaria INMETRO 004/2011.

Tabela 3: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de etiquetagem de módulo fotovoltaico.

Variável	Unidade	Equipamento utilizado na medição	Precisão
Irradiação do meio externo	Wh/m ²	Piranômetro - teste de pré-condicionamento.	± 0,05 μV/W.m ⁻²
Iluminação	Lux	Luxímetro – teste de inspeção visual.	± 2 %
Corrente elétrica	Ampere (A)	Simulador solar	± 1 %
Tensão elétrica	Volt (V)	Simulador solar	± 0,5 %
Potência elétrica	Watt (W)	Simulador solar	± 2 %
Temperatura ambiente	Graus Celsius (°C)	Simulador solar	± 0,1 °C
Temperatura da célula de referência	Graus Celsius (°C)	Simulador solar	± 0,1 °C

Temperatura do módulo	Graus Celsius (°C)	Simulador solar	± 0,1 °C
Irradiação simulada	Wh/m ²	Simulador solar	± 2 %
Resistência elétrica	OHM (Ω)	Megômetro – teste de isolamento elétrico.	± 1 %
Tempo	Minutos	Cronômetro	≤ 1 segundo
Área do módulo fotovoltaico	metro x metro (m ²)	Trena digital – medição de largura e comprimento.	± 1 milímetro para cada dimensão
Temperatura do laboratório de ensaios	Graus Celsius (°C)	Termohigrômetro – todos os ensaios possuem registro de temperatura ambiente.	± 0,1 °C
Umidade do laboratório de ensaios	Umidade relativa (%)	Termohigrômetro - todos os ensaios possuem registro de umidade relativa.	± 1 %

Controladores de carga e descarga são equipamentos de condicionamento de potência. Nos sistemas fotovoltaicos eles permitem a conexão segura e otimizada entre módulos fotovoltaicos e baterias. O controle do processo de carga de uma bateria evita sobrecargas excessivas provocadas pelos módulos fotovoltaicos, enquanto o controle na descarga evita descargas profundas ocasionadas pelas cargas do sistema em questão. Ambos os processos, sobrecarga e descarga profunda, são prejudiciais para a bateria.

O controlador de carga e descarga é, portanto, um elemento que prolonga o tempo de vida de uma bateria. Para a execução dos procedimentos de ensaio em controladores de carga e descarga utilizam-se baterias, fonte de tensão, fonte de corrente, simulador de gerador fotovoltaico, cargas resistivas e instrumentos de medição. No LSF-IEE-USP este conjunto de equipamentos e instrumentos foi organizado em uma bancada de ensaios como mostrado na Figura 31.

Figura 31: Bancada de ensaios para controladores de carga e descarga.

A Tabela 4 mostra a relação dos ensaios exigidos para a etiquetagem de controladores de carga e descarga no contexto da portaria INMETRO 004/2011.

Tabela 4: Ensaios de etiquetagem para controladores de carga e descarga.

Ensaio	Descrição
Verificação inicial	Realizar inspeção visual no controlador e verificar se as informações do manual de operação conferem com as existentes na placa de identificação do equipamento.
Queda de tensão	Medir as tensões nos terminais referentes ao gerador fotovoltaico, à bateria e à carga, a fim de determinar as quedas de tensões internas.
Tensão de desconexão e reconexão do gerador fotovoltaico	Verificar os valores de tensão da bateria que provocam a desconexão e reconexão do gerador fotovoltaico.
Tensão de desconexão e reconexão do gerador fotovoltaico com compensação por temperatura	Verificar os valores de tensão da bateria que provocam a desconexão e reconexão do gerador fotovoltaico quando a temperatura da bateria varia um determinado valor.
Tensão de desconexão e reposição das cargas	Verificar os valores de tensão na bateria que provocam a desconexão e conexão das cargas.
Autoconsumo	Medir a corrente de consumo do controlador quando o gerador fotovoltaico e as cargas estão desconectados.

Proteção contra sobretensão na entrada do gerador fotovoltaico	Verificar se o controlador suporta, nos terminais referentes ao gerador, uma sobretensão de 10% da tensão de circuito aberto do gerador fotovoltaico.
Proteção contra inversão de polaridade na conexão do gerador fotovoltaico	Verificar a atuação da proteção do controlador de carga quando o gerador fotovoltaico é conectado com a polaridade invertida.
Proteção contra inversão de polaridade na conexão da bateria	Verificar a atuação da proteção do controlador de carga quando a bateria é conectada com a polaridade invertida.
Proteção contra inversão na sequência de conexão bateria-gerador fotovoltaico	Verificar a atuação da proteção do controlador de carga quando o gerador fotovoltaico é conectado antes da bateria.
Proteção contra curto-circuito na saída	Verificar a atuação da proteção do controlador de carga quando a saída para as cargas é submetida a um curto-circuito.

O controlador de carga e descarga é aprovado no ensaio de conformidade se: ambas as quedas de tensões, entre gerador fotovoltaico e bateria e entre esta e a carga, forem menores que 0,8 V; o controlador possuir compensação por temperatura para controle da desconexão e conexão do gerador fotovoltaico; o valor da tensão de desconexão e conexão da carga estiver de acordo com o manual do controlador; a corrente de autoconsumo do controlador for menor que 30 mA; e o controlador suportar os demais testes de sobretensão, de inversões da polaridade e de curto-circuito na saída.

A Tabela 5 mostra o conjunto das variáveis medidas nos testes em controladores de carga e descarga.

Tabela 5: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de etiquetagem de controladores de carga e descarga.

Variável	Unidade	Equipamento utilizado na medição	Precisão
Tensão nos terminais referentes ao módulo	Volt (V)	Voltímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica nos terminais referentes ao módulo	Ampere (A)	Amperímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica nos terminais referentes à bateria	Volt (V)	Voltímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 0,5 \%$

Corrente elétrica nos terminais referentes à bateria	Ampere (A)	Amperímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica nos terminais referentes à saída	Volt (V)	Voltímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica nos terminais referentes à saída	Ampere (A)	Amperímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 1 \%$
Temperatura do controlador	Graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)	Sonda externa do termo-higrômetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura da câmara climática usada para teste de elevação de temperatura	Graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)	Sonda externa do termo-higrômetro, sistema de aquisição de dados ou sensor da câmara climática	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Tempo	Minutos	Cronômetro ou sistema de aquisição de dados	≤ 1 segundo
Temperatura do laboratório de ensaios	Graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)	Termo-higrômetro	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Umidade do laboratório de ensaios	Umidade relativa (%)	Termo-higrômetro	$\pm 1 \%$

Até o momento, os ensaios em módulos fotovoltaicos e em controladores de carga e descarga envolveram eletricidade em sua forma contínua. No entanto, quando se pretende utilizar a energia solar para alimentar os equipamentos comumente utilizados na rede elétrica convencional, faz-se necessário o uso de outro equipamento para condicionamento de potência, o inversor. A função do inversor é alterar a forma de apresentação da eletricidade, ou seja, passá-la da forma contínua, vinda dos módulos fotovoltaicos e baterias, para a forma alternada, semelhante à encontrada na rede elétrica de uma concessionária de energia.

Existem dois tipos de aplicações para os inversores de corrente contínua (c.c.) para corrente alternada (c.a.). O primeiro refere-se às aplicações em sistemas isolados, onde não existe a rede elétrica convencional; o segundo, às aplicações para utilização em conjunto com a rede elétrica convencional.

A estrutura para testes em inversores c.c./c.a. para aplicações isoladas da rede elétrica convencional requer baterias, fontes de tensão, cargas e instrumentos de medição. Este conjunto de equipamentos e instrumentos foi organizado em uma bancada de ensaios como mostrado na figura 32.

Figura 32: Bancada de ensaios em inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos isolados.

A Tabela 6 mostra a relação dos ensaios exigidos para a etiquetagem de inversores c.c./c.a. para sistemas isolados no contexto da portaria INMETRO 004/2011.

Tabela 6: Ensaios de etiquetagem em inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos isolados.

Ensaio	Descrição
Verificação inicial	Realizar inspeção visual no inversor e verificar se as informações do manual de operação conferem com aquelas existentes na placa de identificação do equipamento.
Autoconsumo	Medir a corrente contínua de consumo do inversor quando as cargas estão desconectadas.
Eficiência em temperatura ambiente	Medir as correntes e tensões contínuas na entrada e as correntes e tensões alternadas na saída. Com esses dados, calcula-se a eficiência para o funcionamento do inversor com carregamento variando entre 10 % e 100 % da potência nominal.
Distorção harmônica da tensão de saída em temperatura ambiente	Medir a distorção harmônica da tensão de saída do inversor em relação à fundamental de 60 Hz para a faixa de carregamento entre 10% e 100% da potência nominal de

	saída.
Regulação de tensão em temperatura ambiente	Medir a tensão de saída do inversor com carregamento variando entre 10 % e 100 % da potência nominal.
Regulação de frequência em temperatura ambiente	Medir a frequência de saída do inversor com carregamento variando entre 10 % e 100 % da potência nominal.
Avaliação do funcionamento com sobrecarga na saída de 20%	Verificar a operação do inversor quando conectada uma carga equivalente a 120 % da potência de saída durante três minutos.
Avaliação do funcionamento com sobrecarga na saída de 50%	Verificar a operação do inversor quando conectada uma carga equivalente a 150 % da potência de saída durante um minuto.
Avaliação do funcionamento com motor elétrico conectado na saída	Verificar a partida de um motor com potência equivalente a 1/3 da potência de saída do inversor.
Proteção contra inversão de polaridade nos terminais de entrada	Avaliar a atuação da proteção do inversor quando a polaridade nos terminais referentes à bateria está invertida.
Proteção contra curto-circuito nos terminais de saída	Avaliar a atuação da proteção do inversor quando ocorre um curto-circuito na saída.
Eficiência em temperatura de 40 °C controlada	Verificar eficiência como descrito acima, mas em ambiente de 40 °C.
Distorção harmônica da tensão de saída em temperatura de 40 °C controlada	Verificar distorção harmônica como descrito acima, mas em ambiente de 40 °C.
Regulação de tensão em temperatura de 40 °C controlada	Verificar regulação de tensão como descrito acima, mas em ambiente de 40 °C.
Regulação de frequência em temperatura de 40 °C controlada	Verificar regulação de frequência como descrito acima, mas em ambiente de 40 °C.

O inversor c.c./c.a. para uso em sistemas fotovoltaicos isolados é considerado aprovado no ensaio para avaliação da sua conformidade se: a corrente de autoconsumo for menor que 3 % da corrente contínua a plena carga; a eficiência na faixa de 10 % a 50 % da potência nominal for igual ou maior a 80 % e na faixa entre 50 % e 100 % de carregamento for maior que 85 %; a distorção harmônica de tensão for menor que 5 %; as regulações de tensão e de frequência atenderem aos requisitos do PRODIST (procedimentos de distribuição elaborados pela ANEEL, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica); suportar os testes de sobrecarga, partida de motor, inversão de polaridade na

entrada e curto-circuito na saída; e funcionar durante 5 horas na potência nominal em temperatura controlada de 40 °C.

A Tabela 7 mostra o conjunto das variáveis medidas nos testes em inversores c.c./c.a. para sistemas isolados.

Tabela 7: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de etiquetagem de inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos isolados.

Variável	Unidade	Equipamento utilizado na medição	Precisão
Tensão elétrica nos terminais referentes à bateria	Volt (V)	Multímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica nos terminais referentes à bateria	Ampere (A)	Multímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica nos terminais referentes à saída c.a.	Volt (V)	Multímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica nos terminais referentes à saída c.a.	Ampere (A)	Multímetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 1 \%$
Frequência	Hertz (Hz)	Analizador de qualidade de energia	$\leq 0,1 \text{ Hz}$
Distorção harmônica	Percentual em relação à frequência fundamental (%)	Analizador de qualidade de energia	$\leq 2,5 \%$
Temperatura do inversor c.c./c.a.	Graus Celsius (°C)	Sonda externa do termohigrômetro ou sistema de aquisição de dados	$\pm 0,1 \text{ °C}$
Temperatura da câmara climática	Graus Celsius (°C)	Sonda externa do termohigrômetro, sistema de aquisição de dados ou sensor da câmara climática	$\pm 0,1 \text{ °C}$
Tempo	Minutos	Cronômetro	$\leq 1 \text{ segundo}$
Temperatura do laboratório de ensaios	Graus Celsius (°C)	Termohigrômetro	$\pm 0,1 \text{ °C}$
Umidade do laboratório de ensaios	Umidade relativa (%)	Termohigrômetro	$\pm 1 \%$

As descrições dos ensaios para avaliação de inversores c.c./c.a. empreendidas até este ponto trataram dos inversores para uso em sistemas isolados. Os próximos parágrafos discorrem acerca da estrutura, dos ensaios e dos instrumentos de medição empregados para avaliação de inversores c.c./c.a. para uso conectado à rede elétrica de uma concessionária de energia. A estrutura para testes nesses inversores requer a utilização de um simulador de gerador fotovoltaico, um simulador de rede elétrica, cargas e instrumentos de medição, que foram organizados em uma bancada de ensaios como mostrado na figura 33.

Figura 33: Bancada de ensaios em inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

A Tabela 8 mostra a relação dos ensaios exigidos para a etiquetagem de inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no contexto da portaria INMETRO 004/2011.

Tabela 8: Ensaios de etiquetagem em inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Ensaio	Descrição
Verificação inicial	Realizar inspeção visual no equipamento e verificar se as informações do manual de operação conferem com as existentes na placa de identificação do equipamento.
Proteção contra a inversão de polaridade do gerador fotovoltaico	Verificar a atuação da proteção do inversor quando o gerador fotovoltaico é conectado com a polaridade invertida.
Avaliação do funcionamento com sobrecarga na entrada do gerador fotovoltaico	Avaliar se o inversor suporta, na entrada do gerador fotovoltaico, uma sobrecarga de 20% da sua potência nominal.
Resposta às condições anormais de tensão da rede elétrica	Avaliar o funcionamento do inversor quando submetido a afundamentos e elevações de tensão.
Resposta às condições anormais de frequência da rede elétrica	Avaliar o funcionamento do inversor quando submetido a frequências abaixo e acima da normal de operação.
Tempo de reconexão do inversor à rede elétrica após distúrbios na rede	Medir o tempo que o inversor leva para se reconectar à rede elétrica após se desconectar por algum distúrbio na rede.
Ilhamento	Verificar se após uma queda de energia o inversor se desconecta da rede.
Fator de potência	Medir o fator de potência na saída do inversor para diferentes potências de entrada.
Distorção harmônica total	Medir a distorção harmônica da tensão de saída do inversor.
Injeção de componente contínua	Medir a componente contínua existente na saída alternada do inversor.
Eficiência	Avaliar a eficiência do inversor para diferentes valores da potência do gerador fotovoltaico.

O inversor c.c./c.a. para uso em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica é considerado aprovado no ensaio de conformidade se: suportar a inversão de polaridade na entrada c.c. durante 5 minutos; mantiver sua operação normal após sobrecarga de 20% da potência nominal do inversor durante 15 minutos; desconectar da rede elétrica dentro do tempo limite estabelecido por norma, quando submetido às anomalias de tensão e frequência; e reinjetar energia na rede em um período de tempo não inferior a 20 segundos e não superior a 300 segundos, após o restabelecimento das condições normais de tensão e frequência que causaram sua desconexão da rede elétrica.

A Tabela 9 mostra o conjunto das variáveis medidas nos testes em inversores c.c./c.a. para uso conectado à rede elétrica da concessionária de energia.

Tabela 9: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de etiquetagem de inversores c.c./c.a. para sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Variável	Unidade	Equipamento utilizado na medição	Precisão
Tensão elétrica nos terminais referentes ao módulo fotovoltaico	Volt (V)	Analizador de qualidade de energia	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica nos terminais referentes ao módulo fotovoltaico	Ampere (A)	Analizador de qualidade de energia	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica nos terminais referentes à saída alternada	Volt (V)	Analizador de qualidade de energia	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica nos terminais referentes à saída alternada	Ampere (A)	Analizador de qualidade de energia	$\pm 1 \%$
Potência elétrica nos terminais referentes à saída alternada	Watt (W)	Analizador de qualidade de energia	$\pm (0,02 \%$ da medida + $0,04 \%$ da escala)
Frequência	Hertz (Hz)	Analizador de qualidade de energia	$\leq 0,1$ Hz
Distorção harmônica	Percentual em relação à frequência fundamental (%)	Analizador de qualidade de energia	$\leq 2,5 \%$
Tempo	Minutos	Cronômetro	≤ 1 segundo
Formas de onda de tensão e corrente	Volt (V) Taxa de amostragem (Hz)	Osciloscópio	$\pm 1 \%$ ≥ 10 kHz
Temperatura do laboratório de ensaios	Graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)	Termo-higrômetro	$\pm 0,1$ $^{\circ}\text{C}$
Umidade do laboratório de ensaios	Umidade relativa (%)	Termo-higrômetro	$\pm 1 \%$

Todos os ensaios descritos até o momento avaliam o funcionamento de equipamentos fotovoltaicos individualmente, montados em bancadas de testes que simulam a fonte de energia e os demais equipamentos que formam um determinado sistema fotovoltaico. Alguns exemplos que ilustram esta afirmação

são: simulador solar, simulador de arranjo fotovoltaico, simulador de rede elétrica e simulador de carga.

A Tabela 10 mostra os requisitos necessários para a acreditação de laboratório de ensaios em equipamentos para energia solar fotovoltaica, exigidos pelo INMETRO.

Tabela 10: Requisitos necessários para a acreditação de laboratório de ensaios em equipamentos e sistemas fotovoltaicos.

Reconhecimento das medições realizadas pelo laboratório perante instituições metrológicas nacionais e internacionais
O cumprimento dos requisitos da norma NBR ISO/IEC 17025 assegura que os valores medidos para a irradiância, corrente, tensão, potência e energia elétricas, temperatura, umidade relativa, tempo, volume e vazão de água e massa de gelo sejam universalmente aceitos. Quando um laboratório cumpre tais requisitos, torna-se acreditado perante instituições metrológicas.
Normativos
Norma NBR ISO/IEC 17025; portarias INMETRO 004/2011 e 243/2009; normas ABNT/NBR 5410; 16149, 16150 e 62116; normas regulamentadoras do MTE NR-10 e NR-35; resoluções ANEEL 482/2012 e 493/2012, procedimentos de distribuição de energia (PRODIST); norma de distribuição de energia elétrica da concessionária local.
Recursos humanos
Os técnicos envolvidos em atividades laboratoriais devem possuir o registro profissional junto ao CREA. Para cumprimento da NBR ISO/IEC 17025, os ensaios devem envolver, obrigatoriamente, duas pessoas (um técnico que faz e outro que confere), até a validação do relatório técnico final. Todos os treinamentos e qualificações profissionais devem ser registrados no cadastro de competências do funcionário que realiza atividades acreditadas.
Instrumentos de medição
Deve atender às especificações da portaria INMETRO 004/2011 e às normas as quais ela se refere quanto à precisão, erro máximo e incerteza na realização das medidas.
Rastreabilidade da medição
Para cumprimento da NBR ISO/IEC 17025, os instrumentos de medição devem ser calibrados periodicamente em um laboratório acreditado. O relatório de calibração permite rastrear as medidas até um valor de referência, vindo de um equipamento preciso denominado padrão primário.
Ensaio Interlaboratoriais
Para promover uma rede de laboratórios acreditados com confiabilidade e garantia da universalidade do resultado das medidas, faz-se necessária a comparação dos valores encontrados por diferentes laboratórios, para os mesmos ensaios realizados na mesma amostra. No Brasil, o INMETRO é a instituição responsável pelo gerenciamento dos ensaios realizados entre diferentes laboratórios, provendo os procedimentos para a realização da comparação dos

resultados.
Infraestrutura
<p>Recursos humanos, logísticos e de espaço físico necessários para recepcionar, identificar e armazenar as amostras e transportá-las para os locais de exposição ao Sol e para os laboratórios de ensaios; bem como para realizar os ensaios, emitir os relatórios e devolver as amostras aos clientes.</p> <p>Recursos computacionais para manter todos os dados armazenados digitalmente e com cópias de segurança. Recursos organizacionais para manter a documentação relativa aos procedimentos de trabalho do laboratório atualizada, bem como para guardar manuais de equipamentos, relatórios de ensaio, catálogos de produtos e certificados de calibração. Recursos de espaço físico para guardar todos os materiais, ferramentas e acessórios necessários ao ensaio de equipamentos e sistemas fotovoltaicos.</p>

Embora os ensaios em equipamentos de energia solar fotovoltaica garantam a eficiência, confiabilidade e segurança requeridas pelos organismos competentes, a sua montagem para formar um sistema fotovoltaico necessita de ensaios globais que avaliem sua operacionalidade e disponibilidade energética. Em outras palavras, os testes individuais em equipamentos, realizados separadamente em módulos fotovoltaicos, controladores de carga e inversores c.c./c.a., não garantem que o sistema formado pela interconexão destes equipamentos funcione adequadamente.

Para realizar a tarefa de avaliação global de sistema fotovoltaico é necessário montá-lo em um campo de prova como, por exemplo, os mostrados na descrição da estrutura física do LSF-IEE-USP. Para os testes em equipamentos fotovoltaicos, necessita-se de um conjunto de equipamentos para simular situações reais, tais como os simuladores da radiação solar, do módulo fotovoltaico e da rede elétrica. Já para os testes em sistemas fotovoltaicos, monta-se o sistema real e avalia-se o funcionamento do conjunto de maneira global. Estes ensaios avaliam a operacionalidade do conjunto e a disponibilidade do serviço, seja esse na forma de energia elétrica para eletrificação, de água bombeada, de água tratada ou de gelo produzido.

Foram instalados no LSF-IEE-USP diversos arranjos fotovoltaicos, com diferentes tecnologias (Silício monocristalino, policristalino e amorfo), com o objetivo de testar distintas configurações de sistemas para atender à diversidade de aplicações da energia solar fotovoltaica. A este conjunto de geradores de energia, somam-se equipamentos para condicionamento de potência, sistemas de

acumulação de energia e equipamentos de uso final. Todos os elementos citados compõem a estrutura física do referido laboratório e estão dispostos no campo de prova mencionado.

Entre os equipamentos de condicionamento de potência, destacam-se os controladores de carga e descarga, inversores c.c./c.a. e conversores de frequência. Para acumulação de energia, têm-se baterias eletroquímicas, caixas de água e compartimento térmico. Para utilização da energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos, há equipamentos de uso final como motobombas, motores de indução, cargas resistivas, geladeiras, computadores, impressoras, roteadores de *internet*, televisores, lâmpadas, ventiladores, dentre outros. A maioria dos equipamentos de uso final utilizada na rede elétrica convencional pode ser conectada normalmente aos sistemas fotovoltaicos.

A estrutura do campo de prova contempla desde pequenas aplicações, como um poste de iluminação pública alimentado com energia solar, até sistemas maiores, como uma usina solar fotovoltaica conectada à rede elétrica do *campus* da Universidade de São Paulo. Esta última está em fase de construção e conta com recursos da Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 013/2011 da ANEEL – Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração Solar Fotovoltaica na Matriz Energética Brasileira – que prevê a instalação de 525 kWp de módulos fotovoltaicos no LSF-IEE-USP, de diferentes tecnologias de fabricação, arranjados em diversos sistemas conectados à rede elétrica e com distintos níveis de integração ao ambiente construído, como por exemplo instalações sobre o terreno, sobre o telhado e como cobertura de estacionamento.

Finalmente, menciona-se que, embora o INMETRO tenha se manifestado favorável à criação de procedimentos específicos para a avaliação da disponibilidade energética de sistemas fotovoltaicos, na prática isto ainda não ocorreu. Para prover essa carência, os procedimentos usados para os ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética apresentados neste trabalho foram desenvolvidos pelos pesquisadores do LSF-IEE-USP. A Tabela 11 mostra a relação dos ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética de sistemas fotovoltaicos realizados nas dependências do LSF-IEE-USP.

Tabela 11: Ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética realizados em sistemas fotovoltaicos.

Sistema fotovoltaico para bombeamento de água
<p>Operacionalidade – sistema isolado: verificação de funcionamento do conjunto gerador fotovoltaico, conversor de frequência e motobomba. Medição das eficiências dos componentes do sistema.</p> <p>Disponibilidade energética: medição do volume de água bombeado por dia (m^3/dia).</p>
Sistema fotovoltaico para dessalinização de água
<p>Operacionalidade – sistema isolado: verificação de funcionamento do conjunto gerador fotovoltaico, dessalinizador, controlador de carga e baterias. Medição das eficiências dos componentes do sistema.</p> <p>Disponibilidade energética: medição do volume de água dessalinizada por dia (m^3/dia).</p>
Sistema fotovoltaico para produção de gelo
<p>Operacionalidade – sistema isolado: verificação de funcionamento do conjunto gerador fotovoltaico, conversor de frequência e máquina de gelo. Medição das eficiências dos componentes do sistema.</p> <p>Disponibilidade energética: medição da massa de gelo produzida por dia (kg/dia).</p>
Sistema fotovoltaico domiciliar
<p>Operacionalidade: verificação de funcionamento do conjunto gerador fotovoltaico, controlador de carga, inversor c.c./c.a. e baterias. Medição das eficiências dos componentes do sistema.</p> <p>Disponibilidade energética: medições diárias da energia elétrica em corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos; do fluxo de corrente e variações de tensão nas baterias; e da energia elétrica em corrente alternada disponibilizada para as cargas.</p>
Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica
<p>Operacionalidade: verificação de funcionamento do conjunto gerador fotovoltaico, inversor c.c./c.a. e quadro elétrico para conexão com a rede elétrica da concessionária de energia. Medição das eficiências dos componentes do sistema.</p> <p>Disponibilidade energética: medições diárias da energia elétrica em corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos e da energia elétrica em corrente alternada injetada na rede elétrica da concessionária de energia.</p>
Sistema híbrido de geração de energia elétrica
<p>Operacionalidade: verificação de funcionamento dos inversores bidirecionais, inversores c.c./c.a. de conexão à rede elétrica, controladores de carga, baterias, gerador diesel e cargas. Medição das tensões e correntes em cargas como motobombas, motores de indução monofásicos e trifásicos, equipamentos em tensão contínua de 48 V, equipamentos de uso final nas tensões alternadas de 127 V, 220 V e 380 V, dentre outras. Medição das eficiências dos componentes do sistema.</p> <p>Disponibilidade energética: medições diárias da energia elétrica em corrente contínua gerada pelos módulos fotovoltaicos; do fluxo de corrente e variações de tensão nas baterias; e da energia elétrica em corrente alternada disponibilizada para as cargas e injetada na rede elétrica da concessionária de energia. Medição do consumo de óleo combustível do gerador diesel.</p>

2.3. Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água

Os sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água da Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP possuem a configuração de um sistema isolado utilizando conversor de frequência ou a de uma motobomba conectada ao sistema híbrido de geração de energia elétrica. Enquanto sistema isolado utilizando conversor de frequência, opera condicionado às condições de irradiância, não havendo acumulação eletroquímica, mas armazena-se energia potencial gravitacional, já que, ao estocar água a certa altura, ela flui por gravidade até os pontos de coleta da água bombeada.

Na outra configuração é conectada uma motobomba diretamente em um sistema híbrido de geração de energia elétrica, sem a necessidade do conversor de frequência. Nesta opção, as estratégias de operação e gestão do sistema fotovoltaico para bombeamento de água podem ser distintas das utilizadas na configuração como sistema autônomo. Com objetivo de investigar as diferenças entre as duas configurações mencionadas, foram instalados estes dois tipos de sistemas no IEE, conforme ilustram os dois esquemas elétricos das figuras 34 e 35.

Figura 34: Sistema fotovoltaico para bombeamento de água – configuração com conversor de frequência.

No desenho do quadro elétrico com conversor de frequência, verifica-se a presença de componentes usuais em instalações elétricas prediais, como disjuntores e Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS). Embora não estejam

explícitos no diagrama representativo da configuração com sistema híbrido, tais dispositivos encontram-se no quadro de acoplamento da figura 35.

Figura 35: Sistema fotovoltaico para bombeamento de água – configuração com sistema híbrido.

Para melhor visualização dos diversos componentes que constituem os sistemas fotovoltaicos mostrados nos esquemas, seguem fotos que fazem parte do arquivo fotográfico do LSF-IEE-USP. Inicia-se com a fotografia da Figura 36, que mostra os geradores fotovoltaicos utilizados em ensaios de sistemas para bombeamento de água.

Figura 36: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água –geradores fotovoltaicos.

Em razão da variedade de configurações possíveis de sistemas para bombeamento de água utilizando conversores de frequência, motobombas e módulos fotovoltaicos, faz-se necessária a existência de uma estrutura que opere em uma grande gama de possibilidades e armazene as principais variáveis da alternativa sob teste.

Uma dificuldade para a realização de ensaios em sistemas para bombeamento de água refere-se à necessidade de estabelecer condições adequadas para a realização das medições, como, por exemplo, a existência de uma altura efetiva de coluna de água para realização dos testes. Essa condição pode ser alcançada por meio da perfuração de um poço real, da construção de uma torre externa ou de um sistema que simule uma determinada altura monométrica, para citar algumas possibilidades. Escavar um poço ou levantar uma torre são alternativas mais simples, porém demandam maior trabalho operacional para execução do ensaio. A Figura 37 mostra uma montagem com andaime para simular uma altura de 10 metros de coluna de água.

Figura 37: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – montagem de ensaio com coluna de água conhecida.

Com o objetivo de tornar os testes em motobombas mais práticos e versáteis, foi desenvolvida uma bancada para ensaios que simula uma determinada altura de coluna de água, sem a necessidade de uma estrutura como a mostrada na foto da esquerda da Figura 37. A foto da direita mostra duas motobombas imersas no reservatório dessa bancada automatizada. Tal bancada foi desenvolvida por Brito (2006), tendo como referência uma bancada de teste simplificada desenvolvida por Fedrizzi e Sauer (2001).

A fotografia da Figura 38 mostra a bancada de ensaios para sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água do LSF-IEE-USP, na qual se observam o reservatório (na cor azul), a tubulação de água, o quadro elétrico com conversor de frequência, o medidor de vazão, o pressostato, os rotâmetros, o registro de saída e outros componentes dessa bancada.

Figura 38: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – bancada para ensaios de operacionalidade e disponibilidade.

Fonte: Brito (2006).

O sistema fotovoltaico a ser testado é composto por um quadro elétrico com conversor de frequência, um gerador fotovoltaico e uma motobomba. Esse conjunto passa alguns dias conectado na bancada de ensaios até que se obtenha dados estatisticamente relevantes. Nesse universo amostral devem figurar dias com diferentes perfis de insolação, como dias com poucas nuvens, com muitas nuvens, completamente nublados e com irradiação superior a 5 kWh/m^2 .

Os ensaios para a verificação do desempenho operacional determinam o rendimento médio (%) e a produção diária de água (m^3/dia) em função da irradiação diária (kWh/m^2) e da altura manométrica total (m). Contudo, em decorrência das características intrínsecas do sistema de bombeamento solar fotovoltaico sem bateria, a potência que chega ao sistema é variável e acompanha as flutuações da irradiância (W/m^2). Esta situação requer a adoção de instrumentação e procedimentos que mantenham a altura manométrica total a um valor razoavelmente estável ao longo do ensaio (BRITO, 2006).

A Figura 39 evidencia essa instrumentação, na qual uma das motobombas é a amostra sob teste e a outra tem a função de manter a pressão do sistema constante, como se a motobomba sob análise estivesse submersa em um poço real.

Figura 39: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – representação da bancada para ensaios.

Fonte: Brito (2006).

Como dito anteriormente, existem duas configurações de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água desenvolvidas no LSF-IEE-USP: uma na forma de sistema isolado com conversor de frequência e outra conectada na minirrede de um sistema híbrido de energia.

A Figura 40 mostra uma foto de um quadro elétrico para a configuração com conversor de frequência, na qual se observa a presença de componentes de seccionamento e proteção para ambos os circuitos, c.c. e c.a, para a entrada referente ao gerador fotovoltaico e para a saída conectada à motobomba. O circuito c.c. possui um disjuntor bipolar e DPS para os terminais positivo e negativo do gerador fotovoltaico, enquanto o circuito c.a. é composto por disjuntor tripolar e DPS para a saída trifásica. Nota-se, também, a existência da barra de equipotencialização para o condutor terra, conforme exigido pela norma NBR 5410.

Figura 40: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – quadro elétrico com conversor de frequência.

A Figura 41 mostra uma foto do quadro elétrico para conexão de uma motobomba na minirrede trifásica do sistema híbrido para geração de energia elétrica do LSF-IEE-USP.

Figura 41: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – quadro elétrico para conexão com o sistema híbrido.

Esse quadro é composto por um medidor de energia, disjuntores tripolares para corrente alternada e barra de equipotencialização para o condutor terra. Diferentemente da configuração com conversor de frequência, que possui circuitos c.c. e c.a., o quadro para a conexão da motobomba com a minirrede possui somente o circuito c.a., pois a motobomba é conectada diretamente na saída alternada do sistema híbrido.

O sistema híbrido do LSF opera com os mesmos níveis de tensão da rede elétrica de uma concessionária de energia, de forma que o quadro elétrico para conexão da motobomba ao sistema híbrido pode ser utilizado para operação da motobomba com a rede elétrica convencional. O medidor mostrado nesse quadro é da marca *Landis Gyr*, modelo SAGA 2000, com memória interna e interface de comunicação RS-485, com protocolo *ModBus*, o que permite a visualização dos dados à distância.

A bancada para ensaios em sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água do LSF pode simular alturas manométricas de até 100 metros e testar conversores de frequência e motobombas trifásicas na faixa de 0,5 a 2 CV. Também podem ser conectadas à bancada bombas menores, alimentadas por sistemas em corrente contínua. A foto da esquerda na Figura 42 exibe conversores de frequência e a da direita mostra motobombas trifásicas convencionais, equipamentos utilizados nos ensaios de bombeamento de água.

Figura 42: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – alguns conversores de frequência e motobombas testados.

Para facilitar a visualização das variáveis em tempo real e para armazenar os valores de corrente, tensão, pressão, vazão e irradiância, provenientes dos

respectivos sensores durante os dias em que um sistema fotovoltaico passa por ensaios de operacionalidade e disponibilidade, é preciso uma estrutura capaz de medir, armazenar e exibir os dados pertinentes à avaliação da alternativa sob teste. No LSF-IEE-USP esta estrutura é composta por um *datalogger* marca *Agilent*, modelo 34970A, conectado a um computador, como mostrado na Figura 43.

Figura 43: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – aquisição de dados.

A figura 44 mostra um exemplo de gráfico obtido com a estrutura de aquisição de dados mencionada. Observa-se nesse gráfico que o volume de água bombeado pelo sistema fotovoltaico com conversor de frequência sob análise foi 15,25 m³, em um dia com 5,45 kWh/m² de irradiação.

Figura 44: Sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água – gráfico operacional.

Fonte: Brito (2006).

A Tabela 12 mostra as variáveis medidas nos ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética em sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água.

Tabela 12: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água do LSF-IEE-USP.

Variável	Unidade	Medição	Precisão
Irradiação global	Wh/m ²	Estação meteorológica e célula de referência	$\pm 0,05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$
Irradiação difusa	Wh/m ²	Estação meteorológica	$\pm 0,05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$
Temperatura ambiente	Graus Celsius (°C)	Estação meteorológica	$\pm 0,1 ^\circ\text{C}$
Corrente elétrica do gerador fotovoltaico	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do gerador fotovoltaico	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica da motobomba	Ampere (A)	Conversor de frequência	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica da motobomba	Volt (V)	Conversor de frequência	$\pm 0,5 \%$
Altura manométrica	Metros de coluna de água (m.c.a.)	Manômetro	± 1 metro

Pressão	Pressão (bar)	Transdutor de pressão	$\pm 0,1$ bar
Vazão de água	m ³ /h	Medidor digital de vazão	$\pm 0,5$ %

Informações adicionais sobre a instrumentação e os procedimentos utilizados para ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética desses sistemas podem ser consultadas em Fedrizzi e Sauer (2001), Brito e Zilles (2004), Brito e Zilles (2006), Brito et al. (2006) e Brito (2006).

2.4. Sistemas fotovoltaicos para tratamento de água

A opção de instalar sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água no LSF-IEE-USP deve-se à importância que este tipo de aplicação representa para algumas regiões do Brasil, como a Região Nordeste. A dessalinização de água utilizando sistemas fotovoltaicos é uma aplicação da energia solar pouco difundida; no entanto, o seu potencial de expansão é promissor e constitui-se como uma alternativa que pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida de milhares de pessoas. Como exemplo, citam-se algumas doenças associadas à falta ou deficiência no saneamento básico que podem ser controladas por meio do acesso à água de boa qualidade: diarreias, disenterias, febre tifoide, hepatite A, leptospirose, poliomielite, entre outras (FUNASA, 2010).

A tecnologia para tratar a água já existe, mas em muitos casos falta a energia elétrica necessária para o funcionamento do equipamento de dessalinização. Com o intuito de gerar contribuições para a resolução deste problema, foram montados dois sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água: o primeiro em uma configuração isolada utilizando baterias e o segundo conectado ao sistema híbrido de geração de energia elétrica do LSF-IEE-USP, conforme ilustram os dois esquemas elétricos das figuras 45 e 46.

Figura 45: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – configuração como sistema individual com bateria.

Semelhante ao que ocorre nas instalações para sistemas de bombeamento de água, as estratégias de operação e gestão de sistemas fotovoltaicos para tratamento de água na configuração isolada são distintas daquelas utilizadas quando o dessalinizador é alimentado pelo sistema híbrido. Porém, diferente da configuração isolada com conversor de frequência usada para bombeamento de água, a configuração individual com bateria utilizada para dessalinização possibilita o funcionamento do equipamento a qualquer hora do dia e da noite.

Ao analisar os diagramas multifilares das figuras 45 e 46, nota-se que o dessalinizador conectado em sistema individual é alimentado em c.c.; já na configuração com sistema híbrido, o suprimento ocorre em c.a. Essas diferentes maneiras de fornecer energia ao equipamento de dessalinização são possíveis alterando-se o ponto de conexão do dessalinizador com o sistema fotovoltaico em questão. Quando conectado em tensão contínua, o ponto de conexão da saída do controlador de carga com o dessalinizador ocorre após o circuito de retificação, localizado no interior do equipamento. Quando conectado à minirrede, o dessalinizador é utilizado, normalmente, em tensão alternada de 60 Hz, como em qualquer residência do Brasil.

Figura 46: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – configuração com sistema híbrido.

As imagens da figura 47 mostram a estrutura do LSF-IEE-USP para ensaios em sistemas fotovoltaicos de tratamento de água. Nessas fotos, evidenciam-se os seus componentes, a saber: (A) gerador fotovoltaico, instalado em um poste de iluminação pública; reservatório contendo água salobra, localizado na parte superior do andaime; (B) controlador de carga e descarga com alguns disjuntores; (C) abrigo com as baterias; e (D) equipamento dessalinizador, com suas duas saídas, uma contendo água potável e a outra rejeito.

Figura 47: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água do LSF-IEE-USP.

Fonte: Rosa (2013).

A figura 48 mostra um diagrama em blocos da estrutura desenvolvida por Rosa (2013) para ensaios em sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água no LSF-IEE-USP. Nesse esquema, a adição de uma motobomba e de um recipiente ao sistema de tratamento de água possibilita a realização de ensaios durante vários dias sem a necessidade de intervenção humana. Como resultado do processo de tal sistema, obtém-se de um lado água potável para utilização e de outro resíduo gerado para descarte adequado.

Como não se tem uma fonte de água salobra com as mesmas características das encontradas no semiárido brasileiro, requer-se a preparação de uma solução que simule a água a ser dessalinizada. Uma vez acondicionada no reservatório, a solução preparada deve possibilitar o funcionamento do dessalinizador durante vários dias. Para evitar que o reservatório se torne muito grande e para tornar mais operacional o teste com diferentes soluções, foram adicionadas uma

motobomba e um recipiente, mostrados na figura 48. Dessa forma, após a dessalinização, a água potável e o rejeito são misturados novamente e bombeados para o reservatório, permitindo o teste no sistema de dessalinização durante vários dias de modo autônomo.

Figura 48: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – bancada de ensaio.

A fotografia da esquerda na figura 49 mostra o equipamento para dessalinizar água utilizado pelo LSF-IEE-USP. Esse equipamento é composto por filtro de particulados, bomba pressurizadora, filtro de carvão ativado e membrana de osmose reversa. Na mesma foto, observam-se os dois filtros, de particulados e de carvão ativado, ambos substituíveis. Ainda na figura 49 exibe-se à direita o cartucho contendo o filtro de particulados e seus acessórios.

Figura 49: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – equipamento dessalinizador.

Fonte: Rosa (2013).

A figura 50 mostra uma vista interna do aparelho para dessalinizar água, na qual se visualizam o vaso de pressão contendo a membrana de osmose reversa, a bomba pressurizadora e o circuito elétrico que alimenta o equipamento, respectivamente A, B e C.

Figura 50: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – detalhes do dessalinizador.

Fonte: Rosa (2013).

O equipamento de dessalinização é fabricado pela empresa *Permutation – Soluções em Água*, de Curitiba, Estado do Paraná. A Tabela 13 apresenta as principais características do dessalinizador por osmose reversa, modelo *Evolution RO-0220*.

Tabela 13: Sistema fotovoltaico para dessalinização de água – características do dessalinizador.

Item	Descrição
Capacidade para dessalinizar água	10 a 20 litros por hora
Sólidos dissolvidos totais na entrada	Máximo de 2.000 mg/litro
Filtro de particulados	Remoção de partículas em suspensão maiores que 1 μm
Filtro com carvão ativado	Remoção de matéria orgânica
Membrana de osmose reversa	1,8" x 11, 75"
Bomba pressurizadora	Tipo diafragma, motor 24 V em c.c.
Pressão mínima de entrada	0,2 bar
Potência de operação	100 W
Entrada de energia (de fábrica)	220 V, 60 Hz
Entrada de energia (adaptada no LSF)	24 V em tensão contínua
Dimensões do equipamento	35 cm x 15 cm x 40 cm

Como acontece nos ensaios em sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água, nos quais faz-se necessária uma estrutura capaz de medir, armazenar e exibir os dados pertinentes à avaliação da alternativa sob teste, nos sistemas fotovoltaicos para tratamento de água também se requer estrutura similar, desta vez para visualizar e armazenar os valores de corrente, tensão e irradiância, provenientes dos respectivos sensores durante os dias em que o sistema fotovoltaico de dessalinização passa por ensaios de operacionalidade e disponibilidade. Nesses testes, utiliza-se igualmente um *datalogger* do fabricante *Agilent*, modelo 34970A, mostrado na figura 51, conectado a um computador.

Figura 51: Ensaios em sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água – aquisição de dados.

A figura 52 mostra um gráfico operacional do sistema para dessalinização de água. Esse gráfico apresenta a variação do fluxo de água dessalinizada em um período de um ano, utilizando na entrada água salobra com Sólidos Dissolvidos Totais de 2.000 mg/litro. A interpretação desse gráfico revela que o fluxo de água potável foi diminuindo gradativamente e, após 2.300 horas de operação, atingiu 11,7 litros por hora. A análise dessa curva, fluxo de água tratada *versus* tempo, permite determinar a ocasião para manutenção preventiva no equipamento.

Figura 52: Ensaios em sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água – gráfico operacional.

Fonte: Rosa (2013).

Uma vez identificado o momento adequado para se efetuar a manutenção habitual no dessalinizador, deve-se proceder à substituição da membrana que realiza a osmose reversa e de ambos os filtros (particulados e carvão ativado). Após a troca da membrana e dos filtros, ocorrida depois de 2.300 horas de operação, o fluxo de água potável retornou a um valor próximo ao inicial, atingindo 15,9 litros por hora no exemplo relatado.

Com relação ao parâmetro bacteriológico, a análise laboratorial da água tratada pelo dessalinizador demonstrou que o equipamento foi capaz de retirar 100% dos coliformes *E. Coli* presentes na água de entrada, propositalmente contaminada. A Tabela 14 mostra as variáveis medidas nos ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética de sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água.

Tabela 14: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água do LSF-IEE-USP.

Variável	Unidade	Medição	Precisão
Irradiação global	Wh/m ²	Estação meteorológica e célula de referência	$\pm 0,05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$
Irradiação difusa	Wh/m ²	Estação meteorológica	$\pm 0,05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$
Temperatura ambiente	Graus Celsius (°C)	Estação meteorológica	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Corrente elétrica do gerador fotovoltaico	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do gerador fotovoltaico	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica das baterias	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica das baterias	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica do dessalinizador	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do dessalinizador	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Altura manométrica	Metros de coluna de água (m.c.a.)	Manômetro	$\pm 1 \text{ metro}$

A presente seção descreveu, em linhas gerais, a estrutura laboratorial existente no LSF-IEE-USP para avaliação de sistemas fotovoltaicos para tratamento de água. Detalhes sobre a instrumentação e os procedimentos utilizados para ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética desses sistemas podem ser consultados em Rosa (2013).

2.5. Sistemas fotovoltaicos para produção de gelo

Os sistemas fotovoltaicos para produção de gelo do LSF-IEE-USP podem operar de maneira isolada em uma configuração utilizando conversor de frequência ou em uma configuração com sistema híbrido. Enquanto sistema isolado utilizando conversor de frequência, opera condicionado às condições de irradiância, retirando calor da água até que ela atinja a temperatura de 0 °C. A quantidade de calor envolvida nesse processo é definida na literatura como calor sensível. Prosseguindo, o sistema fotovoltaico continua retirando calor do compartimento frio até provocar a solidificação da água.

Essa energia requerida para provocar a mudança no estado físico da água é denominada como calor latente. Esses fenômenos de transferência de calor ocorrem durante todo o dia no interior da máquina de gelo. À noite, com a máquina desligada, a troca de calor entre o ambiente interno e o externo é pequena, graças ao isolamento térmico do compartimento frio. Dessa forma, a temperatura da água contida nesse compartimento sofre apenas um leve acréscimo durante o período noturno.

Outra opção para produzir gelo é conectar a motobomba diretamente em um sistema híbrido de geração de energia elétrica, sem a necessidade do conversor de frequência. Nesta configuração, as estratégias de operação e gestão do sistema fotovoltaico são distintas das utilizadas na configuração como sistema autônomo. Com objetivo de investigar as diferenças entre as duas configurações, foram instalados estes dois tipos de sistemas, conforme ilustram os dois esquemas elétricos das figuras 53 e 54.

Figura 53: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – configuração com conversor de frequência.

Embora seja evidente a similaridade entre o quadro elétrico com conversor de frequência para produção de gelo e o utilizado para bombeamento de água, na prática somente as conexões com os disjuntores e DPS são as mesmas. A principal diferença ocorre na parametrização do conversor de frequência. Parametrizar significa inserir códigos no conversor de frequência, por meio de um teclado existente no próprio equipamento. Esses códigos, listados e descritos no manual do conversor, permitem sua configuração para realizar diferentes funções. Convém mencionar que conversores de frequência são amplamente utilizados na indústria, possuindo inúmeras funcionalidades.

Na configuração com o sistema híbrido de geração de energia elétrica do LSF-IEE-USP, conforme ilustra a figura 54, o sistema para produção de gelo funciona como se estivesse conectado à rede elétrica convencional, podendo produzir gelo durante o dia e à noite.

Figura 54: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – configuração com sistema híbrido.

A figura 55 mostra o gerador fotovoltaico de 1 kWp utilizado no sistema fotovoltaico para produção de gelo na configuração isolada, com conversor de frequência. Ainda nessa figura, nota-se uma célula de referência no mesmo plano do gerador, que tem a função de quantificar a energia solar incidente no arranjo fotovoltaico, o que permite calcular a eficiência do sistema de produção de gelo.

Figura 55: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – gerador fotovoltaico.

A figura 56 mostra a máquina para produção de gelo do LSF-IEE-USP. Nessa foto, percebe-se a presença de dois quadros elétricos, um para conexão da máquina com o conversor de frequência e outro para conectá-la ao sistema híbrido do LSF. O gabinete termicamente isolado da máquina possui capacidade para produção de até 90 kg de gelo.

Figura 56: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – máquina de gelo do LSF-IEE-USP.

A figura 57 evidencia o motor, o compressor e os demais componentes do circuito térmico, a saber: unidade condensadora com compressor de deslocamento positivo (Bitzer ARS 070/2-I), fluido R22 para o circuito refrigerante, válvula solenóide (Danfoss EVR3), válvula de expansão termostática (Danfoss TEX2) e motor de indução (Weg W21) trifásico de quatro polos com 1,5 HP de potência.

Figura 57: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – motor e compressor.

Fonte: Driemeier e Zilles (2010).

As duas fotografias da figura 58 expõem os quadros elétricos para as distintas configurações de sistema fotovoltaico para produção de gelo. A foto da esquerda mostra o quadro elétrico usado para conectar a máquina de gelo ao sistema híbrido, enquanto a da direita exhibe o quadro elétrico com conversor de frequência. O medidor de energia, em destaque na foto da esquerda, é da marca *Landis Gyr*, modelo SAGA 2000, com memória interna e interface de comunicação RS-485.

Distribuídos no interior do quadro elétrico mostrado na foto da direita, encontram-se o conversor de frequência marca WEG, modelo *CFW-08 plus*, com 1,5 HP de potência; a fonte de tensão contínua de 24 V, que alimenta o circuito de controle e a válvula solenóide; o banco de capacitores, para amenizar o *ripple* na tensão de entrada do conversor de frequência; o resistor de precisão, *shunt*, usado para medir a corrente do gerador fotovoltaico; e disjuntores, terminais de conexão e barra de equipotencialização, necessários para interconexão dos componentes.

Figura 58: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – quadros elétricos para as configurações com sistema híbrido e com conversor de frequência.

O diagrama em blocos explicitado na figura 59 permite visualizar que o gerador fotovoltaico está conectado diretamente à entrada do conversor c.c./c.c., cuja saída fornece uma tensão estabilizada de 24 V que alimenta o circuito de controle da máquina de gelo. Como o próprio nome sugere, esse circuito controla o ligamento e desligamento do compressor e da válvula solenóide do circuito de refrigeração. O funcionamento de ambos, motor do compressor e válvula solenóide, inicia-se quando a tensão do gerador fotovoltaico atinge um valor mínimo, que corresponde à potência mínima para o motor trifásico funcionar.

Para a máquina em questão, o circuito de controle aciona a válvula solenóide, que liga o circuito de refrigeração, apenas quando a tensão do gerador fotovoltaico for maior que 310 V, aproximadamente. Abaixo desse valor, o módulo fotovoltaico dissipa sua energia na resistência R, em paralelo com o arranjo fotovoltaico. O banco de capacitores, representado pela letra C na figura, tem lugar para manter a tensão na entrada de ambos equipamentos, conversor de frequência e conversor c.c./c.c., dentro de certos níveis, com a finalidade de assegurar a robustez deste sistema fotovoltaico.

Figura 59: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – diagrama em blocos.

Fonte: Driemeier e Zilles (2010).

Evaporador e condensador, sensores de alta e baixa pressão, compressor e válvula de expansão são alguns dos componentes ilustrados na figura 60, que mostra o circuito refrigerante da máquina utilizada para ensaios em sistemas fotovoltaicos para produção de gelo. O referido compressor conecta-se ao motor por meio de uma correia de acoplamento.

Figura 60: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – circuito refrigerante da máquina para produção de gelo.

Fonte: Driemeier e Zilles (2010).

A figura 61 torna visível o compartimento térmico da máquina de gelo, com as fôrmas dispostas em seu interior. Uma das fôrmas é exibida fora da máquina, ao

lado de acessórios para medição do volume de água a ser congelada. Esse equipamento para produção de gelo é um produto comercial, fabricado pela empresa paranaense Refricol, radicada no município de Marechal Cândido Rondon. No projeto de fábrica, contudo, a máquina de gelo foi concebida para operação conectada a uma rede elétrica convencional trifásica, com frequência constante de 60 Hz.

A possibilidade de conexão desse equipamento a um gerador fotovoltaico, sem o uso de baterias eletroquímicas, foi desenvolvida durante as pesquisas de pós-doutorado de Carlos Driemeier, realizadas no ano de 2010 no LSF-IEE-USP sob a supervisão do professor Roberto Zilles. Já a operação conectada a uma minirrede foi objeto de estudo do autor desta tese durante os trabalhos de montagem do sistema híbrido para geração de energia elétrica da Unidade de Capacitação.

Figura 61: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – compartimento interno e fôrmas da máquina de gelo.

As fotos da figura 62 comprovam o funcionamento do sistema fotovoltaico para produção de gelo do LSF-IEE-USP. A máquina descrita nessa seção é capaz de

produzir 27 kg de gelo em um dia com irradiação de $5,5 \text{ kWh/m}^2$, com 1 kWp de potência fotovoltaica e temperatura inicial da água de aproximadamente 20°C . Esses valores são para a operação na configuração com conversor de frequência. Quando conectada ao sistema híbrido, situação na qual a máquina pode operar 24 horas por dia, a produção de gelo alcança os 90 kg diários, valor semelhante à operação conectada com a rede elétrica convencional.

Figura 62: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – gelo produzido em um dia.

A estrutura para ensaios em sistemas fotovoltaicos para produção de gelo do LSF-IEE-USP conta, para aquisição das variáveis pertinentes, com um *datalogger* marca *Agilent*, modelo 34972A, mostrado na figura 63. Esse modelo permite a conexão do equipamento de aquisição de dados à rede *internet*, o que possibilita monitorar o andamento dos ensaios de operacionalidade e disponibilidade à distância, durante os dias em que o sistema fotovoltaico é testado.

Figura 63: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – aquisição de dados.

Os gráficos justapostos da Figura 64 mostram exemplos de variáveis que podem ser medidas e armazenadas pelo equipamento de aquisição de dados. Na sequência de cima para baixo, os gráficos mostram irradiância, potência disponível no gerador fotovoltaico, velocidade de rotação do motor, tensão do gerador fotovoltaico e pressão de evaporação do circuito refrigerante. Todas essas variáveis são traçadas em função do tempo, entre 8 e 16 horas de determinado dia.

Figura 64: Sistema fotovoltaico para produção de gelo – gráfico operacional.

Fonte: Driemeier e Zilles (2010).

Um exemplo de avaliação técnica resultante da análise das curvas da figura 64 pode ser descrito da seguinte forma: o motor permanece desligado até que a irradiância atinja, aproximadamente, 390 W/m^2 . Nessa condição, a tensão no gerador fotovoltaico alcança um valor na ordem de 310 V, o que possibilita o acionamento do motor trifásico na velocidade angular de 1.260 rotações por minuto (rpm). Nota-se a abertura periódica da válvula solenóide, o que modula a pressão de evaporação do circuito refrigerante. O motor passa a girar mais rápido, acompanhando a disponibilidade de energia solar. A pressão de evaporação passa a ser controlada pela válvula de expansão e a tensão continua em torno dos 310 V.

Prosseguindo a análise, a intensidade da radiação solar aumenta. Aproximase do meio-dia solar, o motor atinge então a velocidade máxima suportada pelo

compressor, que é de 2.310 rpm. A partir desse ponto a tensão do gerador fotovoltaico não se mantém mais constante, mas cresce com o aumento da potência disponível, para que a velocidade máxima não seja ultrapassada. Ao final do dia, a disponibilidade de potência decresce e a velocidade começa a diminuir até atingir o valor mínimo de 1.260 rpm. Finalmente, a potência disponível torna-se menor que a limite e a máquina de gelo desliga.

A Tabela 15 mostra as variáveis medidas nos ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética de sistemas fotovoltaicos para produção de gelo.

Tabela 15: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos para produção de gelo do LSF-IEE-USP.

Variável	Unidade	Medição	Precisão
Irradiação global	Wh/m ²	Estação meteorológica e célula de referência	$\pm 0,05 \mu\text{V}/\text{W.m}^{-2}$
Irradiação difusa	Wh/m ²	Estação meteorológica	$\pm 0,05 \mu\text{V}/\text{W.m}^{-2}$
Temperatura ambiente	Graus Celsius (°C)	Estação meteorológica	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Corrente elétrica do gerador fotovoltaico	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do gerador fotovoltaico	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica da motor	Ampere (A)	Conversor de frequência	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do motor	Volt (V)	Conversor de frequência	$\pm 0,5 \%$
Frequência elétrica do motor	Hertz (Hz)	Conversor de frequência	$\leq 0,1 \text{ Hz}$
Rotação do motor	Rotação por minuto (rpm)	Conversor de frequência	$\leq 1 \text{ rpm}$
Massa de gelo produzida em um ciclo	Quilograma (kg)	Balança eletrônica	$\pm 0,1 \text{ kg}$
Pressão de evaporação	Pressão (bar)	Transdutor de pressão	$\pm 0,1 \text{ bar}$

Como dito anteriormente, em muitas situações não é a falta de solução para um problema que impede a sua resolução, mas sim a falta de energia elétrica para funcionamento de equipamentos. Aproveitar a energia solar para gerar frio e, assim, possibilitar o desenvolvimento local de populações por meio de atividades

produtivas que utilizam gelo foi a motivação para as pesquisas em sistemas fotovoltaicos para produção de gelo no LSF.

Espera-se que esse tipo de aplicação desperte interesse e se dissemine pelo país, para diminuir esforços de parte de sua população que precisa ao menos de gelo, já que a eletricidade para conservação de alimentos, por enquanto, não passa de perspectiva.

Detalhes que possibilitam um entendimento pormenorizado do sistema fotovoltaico para produção de gelo com conversor de frequência podem ser encontrados nas duas publicações de Driemeier e Zilles, realizadas no ano de 2010 e referenciadas na bibliografia desta tese.

2.6. Sistemas fotovoltaicos para eletrificação domiciliar

Sistemas fotovoltaicos para eletrificar domicílios não atendidos pela rede elétrica convencional, denominados na literatura internacional como *Solar Home Systems* e doravante denominados Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares (SFDs), estão regulamentados pela ANEEL desde 2004 e podem, portanto, ser utilizados pelas concessionárias de energia para cumprimento de suas metas de universalização de eletricidade, no âmbito da lei 10.438, publicada pelo Governo Federal no ano de 2002.

O uso desses sistemas fotovoltaicos dentro desse contexto requer tanto o cumprimento das exigências regulatórias cabíveis, das quais a certificação dos componentes do sistema faz parte, quanto a adequação das instalações fotovoltaicas às normas técnicas brasileiras. Além disso, estratégias de gerenciamento devem ser postas em prática para garantir o funcionamento satisfatório dos SFDs. Tais estratégias, entre outras atribuições, devem operacionalizar o serviço de atendimento aos usuários e prever a coleta e controle das informações referentes à eletrificação.

Um SFD típico é formado por gerador fotovoltaico, bateria eletroquímica, controlador de carga e inversor c.c./c.a. O sistema funciona da seguinte forma:

durante o dia, o gerador fotovoltaico fornece energia para o domicílio e para carregar as baterias; à noite, o inversor recorre à bateria para fornecer eletricidade para os equipamentos de uso final. O sistema de acumulação deve ser projetado para possuir alguns dias de autonomia, para evitar faltas de energia a cada sequência de dias nublados. A resolução ANEEL 493/2012 determina dois dias de autonomia para SFDs.

A figura 65 apresenta o diagrama elétrico genérico dos sistemas fotovoltaicos para eletrificação de domicílios remotos existentes no LSF-IEE-USP³.

Figura 65: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar – configuração com sistema individual.

A figura 66 exibe o diagrama elétrico do sistema híbrido do LSF-IEE-USP, destacando o desenho de uma casa. Essa alusão refere-se a um domicílio ou a qualquer espécie de habitação, seja ela domiciliar ou comunitária, como centros comunitários, escolas, postos de saúde, centros de formação profissional, comunicação radiofônica, entre outras aplicações, algumas elencadas na figura 2.

³ Na Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP existem alguns protótipos de SFDs, entre eles: sistema para fornecimento de energia para equipamento de monitoramento de descargas atmosféricas, sistemas para suprimento elétrico de coleta de dados meteorológicos, kits didáticos e protótipo de SIGFI13. Nesta tese, por questões de espaço, apresenta-se apenas um Sistema Fotovoltaico Domiciliar do tipo SIGFI45.

Figura 66: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar – configuração com sistema híbrido.

A figura 67 mostra uma habitação que possui um sistema fotovoltaico domiciliar. Tal construção faz parte da infraestrutura do LSF-IEE-USP e é utilizada como um laboratório de pesquisa. A gênese deste sistema fotovoltaico teve como motivação a existência de inúmeras escolas rurais sem eletricidade no país. Constatada essa realidade, propôs-se à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), em 1995, um projeto para construir uma habitação com um sistema fotovoltaico.

Além da preocupação em definir uma construção que pudesse representar fisicamente essas escolas, em termos de área construída, dimensionou-se um sistema que demonstrasse a viabilidade da energia solar no atendimento de demandas tipicamente requeridas para atividades educacionais, tais como: iluminação, uso de computadores, retroprojetores, equipamentos de telecomunicações, entre outros.

A concretização dessa proposta pode ser visualizada nas fotos exibidas nas figuras 67, 68 e 69. Na primeira dessas fotos, observa-se uma vista do arranjo

fotovoltaico instalado nessa construção, no mesmo plano do telhado, como uma espécie de vivência coberta.

Figura 67: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar do LSF-IEE-USP – protótipo de escola rural.

Esse laboratório, construído em forma de escola rural, representa muitas dessas instituições remotamente localizadas, cuja composição de cômodos se resume a uma sala multisseriada, uma cozinha e um banheiro. A figura 68 mostra os equipamentos para condicionamento de potência, controlador de carga, inversor c.c./c.a. e quadros elétricos de medição, seccionamento e distribuição de energia elétrica desse sistema fotovoltaico.

Figura 68: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar – instalações internas.

Agregou-se um sistema para bombeamento de água a essa construção, aumentando-se o rol de benfeitorias propiciadas pela energia solar. A figura 69 mostra outra vista dessa habitação/laboratório: em primeiro plano, observa-se a caixa de água e, ao seu lado esquerdo, em segundo plano, nota-se o abrigo de baterias, coberto com telhas e cercado por tela. Esse sistema fotovoltaico, hoje em dia, pode ser enquadrado como um SIGFI45, conforme Resolução ANEEL 493/2012.

Figura 69: Sistema fotovoltaico para eletrificação domiciliar – vista do abrigo para baterias e da caixa de água da habitação.

A figura 70 mostra um *datalogger* Agilent 34970A conectado a um computador, ambos integrantes da estrutura de aquisição de dados utilizada para ensaios em sistemas fotovoltaicos domiciliares. O referido *datalogger* é recorrente nos ensaios realizados no LSF, pelo fato de permitir a aquisição de até 60 variáveis com níveis de tensão de 1 μV a 300 V e com frequência até 500 Hz⁴.

Essa versatilidade justifica a existência de alguns desses equipamentos no LSF, o que possibilita a medição de variáveis durante o período em que os sistemas fotovoltaicos passam por ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética. Na tela do computador que aparece na foto da figura 70, nota-se um modo de visualização de variáveis em tempo real e no *display* do *datalogger* aparece o valor da irradiância na ocasião da medida, próximo a 99 W/m².

⁴ A frequência do sinal que o *datalogger* consegue registrar depende do número de variáveis que estão sendo medidas. Isso ocorre porque o modelo 34970A é um multiplexador, quer dizer, ele mede uma variável por vez. Nos ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética, um intervalo de medida de até 5 segundos apresenta uma boa relação de compromisso entre precisão e capacidade de memória interna do equipamento registrador de dados. A lista das variáveis medidas em cada um dos sistemas fotovoltaicos do LSF-IEE-USP pode ser verificada nas tabelas que encerram as seções 2.3 a 2.8.

Figura 70: Ensaios em sistemas fotovoltaicos para eletrificação domiciliar – aquisição de dados.

A figura 71 mostra um exemplo de gráfico, elaborado a partir dos dados armazenados da memória interna do *datalogger*, que auxilia na avaliação técnica de um sistema fotovoltaico domiciliar. As curvas desse gráfico relevam o comportamento de algumas variáveis em função do tempo, são elas: irradiância global no plano inclinado, tensão contínua nos três terminais do controlador de carga e descarga e tensão alternada em 60 Hz na saída do inversor c.c./c.a. Nota-se, observando o gráfico da irradiância, que esse dia de ensaio foi ensolarado durante a manhã e com muitas nuvens na parte da tarde.

Figura 71: Ensaios em sistemas fotovoltaicos para eletrificação domiciliar – gráfico operacional.

A Tabela 16 mostra as variáveis medidas nos ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética de sistemas fotovoltaicos domiciliares.

Tabela 16: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos domiciliares do LSF-IEE-USP.

Variável	Unidade	Medição	Precisão
Irradiação global	Wh/m ²	Estação meteorológica e célula de referência	$\pm 0,05 \mu\text{V}/\text{W.m}^{-2}$
Irradiação difusa	Wh/m ²	Estação meteorológica	$\pm 0,05 \mu\text{V}/\text{W.m}^{-2}$
Temperatura ambiente	Graus Celsius (°C)	Estação meteorológica	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Corrente elétrica do gerador fotovoltaico	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do gerador fotovoltaico	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica das baterias	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica das baterias	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica das cargas	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica das cargas	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Energia elétrica das cargas	Ampere-hora (Ah)	Medidor de Ah	$\leq 0,01 \text{ Ah}$

Uma análise nas características elétricas do dessalinizador permite concluir que ele poderia ser utilizado diretamente em um sistema fotovoltaico domiciliar. Nesta tese, ele foi apresentado separadamente por dois motivos: o primeiro, refere-se à importância do tema. A água potável é fundamental para a qualidade de vida das pessoas, o que justifica o desenvolvimento de sistemas que ampliem o leque de opções e contribuam para a disseminação de dessalinizadores. Nesse sentido, fazer funcionar o equipamento de dessalinização sem a necessidade do inversor c.c./c.a., por si só, mereceria uma abordagem diferenciada.

O segundo motivo está relacionado ao assunto desta tese, que aborda a estrutura necessária para laboratórios de ensaio executarem atividades acreditadas no âmbito da norma IEC 17025. Como visto, os ensaios em sistemas fotovoltaicos para tratamento de água requerem uma estrutura que contenha caixa

de água, tubulações, água salobra e água contaminada com coliformes, além de questões intrínsecas ao dessalinizador, o que justifica uma seção à parte.

Como considerações finais a respeito dos sistemas fotovoltaicos domiciliares, ressalta-se que a compreensão dos princípios de funcionamento desse tipo de sistema é um importante ponto de partida na formação de recursos humanos em sistemas fotovoltaicos. O entendimento dos conceitos envolvidos no dimensionamento de SFDs auxilia no processo de aprendizagem de outras aplicações. Comparações entre formas de acumulação de energia e a explicação dos diferentes valores e formas da eletricidade são alguns exemplos de saberes que podem ser abordados com esse tipo de sistema. Para aprofundamento no tema Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares, seus componentes e dimensionamento, recomendam-se as seguintes referências: Lorenzo (1994); GTES (1999); e Tiba (1999).

2.7. Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica

A conexão de sistemas fotovoltaicos à rede convencional de distribuição de eletricidade ocupa lugar cada vez mais expressivo entre as aplicações da tecnologia, pois possibilita o uso de energia solar em centros urbanos ou em qualquer outro local onde exista uma rede elétrica, dispensando o uso de acumuladores eletroquímicos de energia e permitindo que a energia excedente possa ser entregue à rede de distribuição.

Com a ajuda de um inversor, a energia fotovoltaica produzida em tensão contínua fica disponível em tensão alternada, podendo então ser entregue à rede de distribuição de eletricidade ou utilizada em qualquer um dos equipamentos elétricos instalados na edificação, dependendo da forma como é feita a instalação e/ou do tipo de contrato firmado com a empresa distribuidora de eletricidade.

A figura 72 mostra a configuração básica dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica que integram a Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP.

Figura 72: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica de uma concessionária de energia.

A descrição dos sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica inicia-se com a apresentação de um seguidor solar de um eixo desenvolvido no LSF. Sistema fotovoltaico com seguimento solar é um sistema em que o arranjo fotovoltaico se movimenta, seguindo a trajetória aparente do Sol ao longo do dia, com o objetivo de maximizar a energia solar coletada pelos módulos fotovoltaicos. A figura 73 mostra uma foto do seguidor solar de um eixo do LSF-IEE-USP.

Figura 73: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – seguidor solar de um eixo do LSF-IEE-USP.

Sistemas com seguimento solar podem ser usados em qualquer um dos sistemas fotovoltaicos descritos nesta tese, pois o fato de o gerador fotovoltaico se movimentar não altera a forma da energia coletada, somente sua quantidade. Esse tipo de sistema é mais comumente utilizado em centrais fotovoltaicas conectadas à rede elétrica instaladas em localidades com bons níveis de irradiância direta, pois em lugares com bastante incidência de nuvens o seguimento solar torna-se menos atrativo.

Embora os sistemas fotovoltaicos com seguimento solar apórtm ganhos diários na geração de eletricidade, seu uso requer atenção quanto aos mecanismos que movimentam os módulos fotovoltaicos e ao sombreamento que a movimentação pode causar em outros sistemas solares. A dificuldade para a instalação desse tipo de sistema também deve ser considerada; em telhados já existentes, por exemplo, talvez não seja interessante essa configuração.

Outra situação desvantajosa para sistemas com seguimento solar é a instalação em localidades remotas, onde a introdução de mais componentes, como o circuito eletrônico de controle e as partes mecânicas móveis, aumenta também a probabilidade de falhas e desligamentos no sistema fotovoltaico. Igualmente deve-se verificar a rede de assistência técnica para os componentes responsáveis pela movimentação do gerador fotovoltaico.

A figura 74 mostra o seguidor solar de um eixo do LSF sob outra perspectiva, desta vez destacando a estrutura de suporte e o quadro elétrico que abriga o circuito de controle.

Figura 74: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – estrutura de suporte e quadro elétrico de controle do seguidor solar de um eixo.

O circuito eletrônico para controle da movimentação dos módulos fotovoltaicos, instalado no interior do quadro elétrico mostrado na figura 74, é mostrado na figura 75.

Figura 75: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – quadro elétrico de controle do seguidor solar de um eixo.

O diagrama em blocos da figura 76 ilustra como o circuito de controle que movimenta o gerador fotovoltaico funciona. A placa de controle recebe sinais elétricos de três dispositivos (sensor de posição angular, sensor óptico e chave fim de curso). A placa processa esses sinais e envia um comando para o *drive* que aciona o motor. Este é responsável por realizar o trabalho mecânico de movimentação do arranjo fotovoltaico no decorrer do dia, uma vez que o arranjo deve acompanhar a trajetória aparente do Sol de Leste a Oeste. Ao anoitecer, o gerador está voltado para Oeste, pois acompanhou o ocaso do Sol. A placa de controle envia, então, um comando para o *drive*, para que movimente o gerador fotovoltaico para Leste, onde o Sol nascerá no dia seguinte.

Figura 76: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – diagrama em blocos da unidade de controle do seguidor solar de um eixo.

As fotos da figura 77 exibem os três dispositivos citados anteriormente, da esquerda para a direita e de cima para baixo: a chave fim de curso, o sensor óptico, a placa de controle e o sensor de posição angular.

Figura 77: Sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica – fotos dos componentes da unidade de controle do seguidor solar de um eixo.

Outro tipo de seguidor solar pode ser implementado com uma estrutura que se movimenta em dois eixos, chamado seguidor solar de dois eixos. Enquanto no seguidor solar de um eixo o movimento do gerador fotovoltaico ocorre apenas de Leste para Oeste, no seguimento com dois eixos o arranjo também se movimenta no sentido Norte/Sul. Esse grau de liberdade permite que os módulos fotovoltaicos acompanhem a trajetória aparente do Sol durante todo o ano, adequando-se à variação da declinação solar.

A figura 78 mostra uma foto de dois sistemas fotovoltaicos conectados à rede com seguimento solar de dois eixos. Esses sistemas fotovoltaicos fazem parte da estrutura do LSF-IEE-USP, porém estão localizados no município de Ilha Solteira, Estado de São Paulo. Em primeiro plano, na figura 78, mostra-se um sistema fotovoltaico com concentração solar e, ao seu lado, tem-se um sistema fotovoltaico com módulos convencionais de Silício monocristalino.

Figura 78: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – seguidores solares de dois eixos do LSF-IEE-USP.

A figura 79 mostra outra vista das estruturas de sustentação dos geradores fotovoltaicos, destacando o inversor c.c./c.a. de conexão à rede elétrica e os quadros elétricos de controle de posicionamento do seguidor solar.

Figura 79: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – inversores c.c./c.a. e quadros elétricos dos seguidores de dois eixos.

Com o propósito de verificar as condições ambientais nas proximidades dos dois seguidores solares, instalou-se uma estação meteorológica para medição de variáveis atmosféricas como irradiância global e difusa; temperatura e umidade relativa; e velocidade e direção do vento. Esta estação e seus sensores são exibidos na figura 80.

Figura 80: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – estação meteorológica dos seguidores de dois eixos.

As fotos da figura 81 mostram detalhes dos componentes da estação meteorológica instalada em Ilha Solteira, ao lado dos dois seguidores solares de dois eixos conectados à rede elétrica. Uma importante característica dessa estação, no sentido de facilitar a operação e a coleta de dados, é a existência de uma esfera sombreadora que se movimenta automaticamente, com a finalidade de sombrear a cúpula de um dos piranômetros. Essa funcionalidade da estação possibilita a medição da irradiância difusa sem a necessidade de intervenção humana, ao contrário da estação meteorológica mostrada na figura 20, na qual é imperativo o ajuste manual do anel de sombreamento para obtenção da irradiação difusa.

A fotografia da esquerda na figura 81 mostra os dois piranômetros e o mecanismo com a esfera sombreadora. A da direita mostra o *datalogger* para armazenamento dos dados provenientes dos sensores e o *modem* de comunicação por radiofrequência. Este último permite o acompanhamento da operação dos dois seguidores à distância, desde o *campus* da USP, na cidade de São Paulo.

Figura 81: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – piranômetros, esfera de sombreamento e sistema para aquisição e transmissão de dados dos seguidores de dois eixos.

Tornando a discorrer sobre o tema sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica existentes no *campus* da USP, mas tratando de sistemas conectados à rede convencional nos quais o gerador fotovoltaico permanece fixo, o LSF possui um campo de provas para ensaios em sistemas desse tipo. A figura 82 mostra uma vista de alguns dos arranjos fotovoltaicos que compõem a infraestrutura para ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética em sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Figura 82: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – vista dos sistemas do LSF instalados no terreno, fachada e telhado do prédio de administração do IEE-USP.

Esse campo de provas foi concebido com o intuito de apresentar diferentes possibilidades de integração de sistemas fotovoltaicos ao ambiente construído. Para tanto, esses sistemas foram instalados de quatro modos distintos: sobre o terreno, com os módulos próximos ao solo, como se fosse uma central fotovoltaica; integrados à fachada, em uma disposição em brise; na laje de um prédio, acima das telhas já existentes; e na forma de estacionamento⁵, sombreando automóveis. A figura 83 mostra uma vista da instalação tipo central fotovoltaica de 150 kWp e uma parte da instalação integrada à fachada do prédio de administração do IEE-USP, com potência de 12,5 kWp.

Figura 83: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – vista da fachada do prédio de administração do IEE-USP.

O eletrocentro, nome dado a um container que abriga o inversor central de 150 kW e demais equipamentos de transformação de energia e comunicação de dados da instalação na forma de central, é mostrado na figura 84.

⁵ O sistema fotovoltaico para conexão à rede elétrica, integrado ao ambiente como uma cobertura para automóveis, está em fase de construção. Seu projeto prevê a instalação de 150 kWp de módulos fotovoltaicos distribuídos no estacionamento do prédio de administração do IEE-USP.

Figura 84: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – eletrocentro.

No interior do eletrocentro existe um único inversor c.c./c.a. para conexão à rede com potência de 150 kW. Isso quer dizer que todos os arranjos fotovoltaicos instalados sobre o terreno estão conectados nesse equipamento. As fotos da figura 85 mostram uma vista completa do cubículo elétrico que abriga o inversor central c.c./c.a. e o seu painel, com o display para visualização de parâmetros do sistema e com a botoeira para parada de emergência.

Figura 85: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – painel de comando do inversor instalado no eletrocentro.

A figura 86 exhibe algumas fileiras de módulos fotovoltaicos instaladas sobre o prédio de administração do IEE. As estruturas de sustentação dos arranjos fotovoltaicos foram postas acima das telhas, não apoiando-se nelas, mas fixando-as na laje que está embaixo do telhado.

Figura 86: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – vista do telhado do prédio de administração do IEE-USP.

Os geradores fotovoltaicos pertencentes ao sistema fotovoltaico conectado à rede de 75 kWp instalado sobre o telhado da administração do IEE estão agrupados em cinco fileiras, cada uma ligada à entrada de um inversor c.c./c.a. A saída dos inversores, cinco portanto, são conectadas em paralelo ao primário de um transformador de 220 V para 13,8 kV. A foto da esquerda da figura 87 mostra um desses inversores, embaixo de uma fileira de módulos fotovoltaicos, ao lado de uma caixa de junção. A fotografia da direita mostra o transformador de baixa para média tensão, sendo que na baixa tensão estão as saídas dos cinco inversores c.c./c.a. e, na média, um ramal de 13,8 kV vindo de uma cabine primária do IEE.

Figura 87: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – vista de alguns arranjos e do transformador de 75 kVA.

Na seção sobre conceitos e fundamentos sobre a energia solar fotovoltaica, explicou-se que a instalação de um sistema fotovoltaico conectado à rede em uma residência possibilita o intercâmbio de energia entre as instalações elétricas da casa e a rede elétrica da concessionária de eletricidade, possibilitando a transferência do excedente de energia gerada pelo domicílio para a rede convencional. Porém, ainda que nunca ocorra um excedente de energia ou que o consumo de energia da casa seja maior que a energia produzida pelo sistema fotovoltaico, a energia solar contribuiria ao menos para a redução da conta de energia desse consumidor.

A afirmação que um sistema fotovoltaico reduz a conta de luz de uma casa serve de epígrafe para mostrar a figura 88, cujo gráfico mostra duas curvas que delimitam três áreas. Uma curva, identificada como P_c , mostra a potência instantânea demandada por uma residência; outra, chamada P_{FV} , representa a potência instantânea disponível na saída do inversor de um sistema fotovoltaico instalado nessa residência. Quando justapostas, essas curvas permitem avaliar se a conta de energia é menor. Analisa-se se, caso o sistema fotovoltaico não existisse na casa, a energia consumida da rede elétrica seria matematicamente igual à área sob a curva P_c .

Com a instalação do sistema fotovoltaico na casa, tem-se uma energia gerada numericamente igual a área sob a curva P_{FV} . Um medidor de energia que atenda à resolução ANEEL 482/2012 consegue medir o fluxo de energia entre essa casa e a rede elétrica da concessionária, isto é, ele é capaz de distinguir a energia direta e a

inversa. As áreas delimitadas por essas duas curvas, P_c e P_{FV} , representam a energia adquirida, a entregue e a consumida por essa casa. A interpretação dessas áreas permite reafirmar que o sistema fotovoltaico reduz a conta de energia de um domicílio.

Figura 88: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – gráfico operacional.

A figura 89 mostra um exemplo de gráfico, extraído do equipamento de aquisição de dados, que permite a avaliação técnica do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica instalado na fachada do prédio de administração do IEE. Essa figura mostra a energia injetada na rede pelos três inversores c.c./c.a. que compõem o referido sistema.

Figura 89: Sistemas fotovoltaicos para conexão à rede elétrica – gráfico operacional do sistema fotovoltaico do LSF instalado na fachada do prédio da administração do IEE-USP.

A tabela 17 mostra as variáveis medidas nos ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Tabela 17: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica do LSF-IEE-USP.

Variável	Unidade	Medição	Precisão
Irradiação global	Wh/m ²	Estação meteorológica e célula de referência	$\pm 0,05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$
Irradiação difusa	Wh/m ²	Estação meteorológica	$\pm 0,05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$
Temperatura ambiente	Graus Celsius (°C)	Estação meteorológica	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Corrente elétrica do gerador fotovoltaico	Ampere (A)	Shunt	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do gerador fotovoltaico	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica do inversor	Ampere (A)	Inversor c.c./c.a.	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do inversor	Volt (V)	Inversor c.c./c.a.	$\pm 0,5 \%$
Energia injetada na rede elétrica	Watt-hora (Wh)	Medidor de energia elétrica	$\pm 0,5 \%$

O uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica permite que cada cidadão contribua para a geração de eletricidade do Brasil. Transformar um telhado em gerador fotovoltaico, mesmo que instalando módulos com uma classificação de eficiência baixa junto ao INMETRO, significa aumentar em ao menos 10 % a eficiência energética-espacial de um domicílio. Ressalta-se, portanto, que discussões a respeito de eficiência devem considerar o contexto já existente, qual seja, um telhado que não produz energia alguma.

Argumentos que comparam a energia solar com outras opções e afirmam que a eficiência de módulos fotovoltaicos comerciais não passa de 20 %, como se isso fosse impeditivo para a disseminação da tecnologia, devem ser vistos com muita cautela, pois avaliações dos benefícios de determinada tecnologia para uma residência devem partir da conjuntura instaurada e de todas as externalidades envolvidas.

2.8. Sistemas híbridos para geração de energia elétrica

O fornecimento de energia pela rede elétrica convencional é inviável em muitas áreas remotas, em razão das dificuldades de acesso e dos custos elevados para construção de usinas ou de longas linhas de transmissão. Por isso, até o presente, a alternativa mais usual para o atendimento dessas cargas isoladas, sejam elas pequenas comunidades ou aplicações pontuais, como repetidoras de telecomunicações e bombeamento de água, por exemplo, é por meio de grupos geradores a diesel, em uma configuração diesel-elétrica.

A energia elétrica desses sistemas é gerada pelo funcionamento de um motor a diesel acoplado mecanicamente a um gerador elétrico. Quando o motor é ligado, ele faz girar o rotor do gerador, o que produz eletricidade por meio do fenômeno de indução eletromagnética. Para distribuição dessa energia elétrica gerada, utilizam-se postes com condutores elétricos, como ocorre nos centros urbanos, mas em uma extensão reduzida, que se limita a centenas de metros ou a poucos quilômetros.

Esses sistemas são frequentemente denominados minirredes diesel por apresentarem essa extensão física menor, quando comparada à rede elétrica convencional. É conveniente esclarecer que o prefixo mini, presente no nome da rede, tem apenas conotação espacial, pois na verdade essas minirredes conseguem fornecer potências elevadas, com níveis de tensão e frequência equivalentes aos existentes nas redes elétricas dos centros urbanos. Quando, a um sistema como esse, agrega-se um sistema fotovoltaico, tem-se um sistema diesel-solar, híbrido portanto, também chamado de minirrede diesel-fotovoltaica.

O uso de minirredes híbridas tem despertado interesse de concessionárias de energia elétrica no âmbito da universalização 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.

As minirredes instaladas no LSF-IEE-USP são do tipo diesel-fotovoltaica para uso em comunidade isoladas, mas também podem funcionar conectadas à rede elétrica convencional, podendo injetar ou consumir energia da rede elétrica de uma concessionária. Essa característica de conexão à rede tradicional permite que minirredes do tipo fotovoltaica-rede elétrica sejam usadas como sistemas de emergência caso falte energia da rede, como acontece com os geradores a diesel e equipamentos chamados de *no-break* usados para provimento de eletricidade. Um sistema híbrido pode ser então utilizado como um equipamento *no-break* em centros urbanos, uma espécie de *no-break* solar.

A figura 90 mostra os principais componentes de um sistema híbrido do tipo diesel-fotovoltaico-rede elétrica, similar aos instalados no LSF-IEE-USP. Nesse desenho, a minirrede começa na saída do quadro de transferência e finaliza na casa. Em uma comunidade remota, onde não existe a rede elétrica convencional, a minirrede começa no gerador diesel e se estende pela comunidade por meio de postes e condutores elétricos que distribuem a energia para os domicílios. Ela termina no último poste de distribuição, onde os cabos são devidamente amarrados em isoladores elétricos aparafusados no poste.

Figura 90: Sistemas híbridos para geração de eletricidade – minirrede isolada ou conectada à rede elétrica convencional.

Fonte: Manual do equipamento SI 5048 da empresa alemã SMA.

Nesse sistema híbrido para geração de eletricidade, a energia solar pode ser injetada diretamente nas cargas dos equipamentos de uso final, em corrente alternada, ou no banco de baterias, em corrente contínua. O ponto onde é conectado o sistema fotovoltaico determina a forma de acoplamento dele ao sistema híbrido. A literatura define como acoplamento c.c. aquele no qual a energia fotovoltaica é injetada diretamente no banco de baterias, e como acoplamento c.a. aquele no qual o sistema fotovoltaico é conectado na parte alternada do sistema híbrido, formando um sistema fotovoltaico conectado à minirrede.

Na figura 90 é mostrado apenas o acoplamento c.a., mas nas minirredes do LSF existem as duas formas de acoplamento (c.c. e c.a.), definidas como acoplamento misto. Convém mencionar que o inversor c.c./c.a. que se conecta na minirrede do sistema híbrido é o mesmo usado para conexão à rede elétrica de uma concessionária de energia, descrita na seção precedente.

Além dos equipamentos ilustrados na figura 90, a estrutura para ensaios em sistemas híbridos de geração de energia do LSF-IEE-USP conta com medidores de qualidade de energia, osciloscópios, dispositivos para comunicação de dados em um barramento RS-485 e contadoras para controle dos geradores e cargas. Todos esses elementos permitem avaliar diferentes estratégias de operação, que

possibilitam a formulação de critérios para decisão sobre opções de atendimento por meio de sistemas fotovoltaicos.

Nesse tipo de sistema híbrido de geração com acoplamento misto instalado no LSF, as cargas, os inversores c.c./c.a. e o gerador diesel são acoplados de forma independente no barramento c.a., enquanto os inversores bidirecionais e controladores de carga são conectados no barramento c.c. Os equipamentos interligados ao barramento c.a. podem ser tanto consumidores quanto geradores de eletricidade. Os controladores de carga do barramento c.c. funcionam como geradores de energia enquanto as cargas c.c. são os consumidores de corrente contínua.

A figura 91 mostra o diagrama elétrico do sistema híbrido monofásico para geração de energia elétrica instalado na Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP.

Figura 91: Sistema híbrido para geração de energia elétrica do LSF-IEE-USP – configuração monofásica.

Em primeiro plano, na figura 92, mostra-se o gerador de 720 Wp usado em um dos inversores c.c./c.a do sistema híbrido monofásico do LSF.

Figura 92: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – geradores fotovoltaicos do sistema monofásico.

As fotos da figura 93 exibem os componentes que realizam o acoplamento c.c. no sistema híbrido monofásico. Da esquerda para a direita e de cima para baixo, tem-se: o gerador fotovoltaico de 390 Wp, montado em uma estrutura sobre rodas; o controlador de carga que realiza o acoplamento c.c. do arranjo fotovoltaico com o banco de baterias; o quadro elétrico de acoplamento c.c.; e as quatro baterias eletroquímicas.

Figura 93: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – componentes do acoplamento c.c. do sistema monofásico.

Os componentes para condicionamento de potência da minirrede monofásica ilustrados na figura 90 podem ser visualizados na figura 94. Nela aparecem os três inversores para conexão à rede, o inversor bidirecional, o controlador de carga e alguns quadros elétricos do sistema híbrido monofásico do LSF-IEE-USP.

Figura 94: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – inversor bidirecional, inversores c.c./c.a. de conexão à rede, controlador de carga e quadros elétricos do sistema monofásico.

Nas fotos da figura 95 tem-se, à esquerda, o quadro de transferência entre gerador diesel e rede elétrica e, à direita, o gerador diesel de 6 kVA, ambos utilizados no sistema híbrido monofásico do LSF.

Figura 95: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadro de transferência e gerador a diesel do sistema monofásico.

Na figura 96 é mostrado o equipamento de aquisição de dados da minirrede monofásica do LSF.

Figura 96: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – aquisição de dados do sistema monofásico.

A figura 97 mostra uma tela para visualização de parâmetros do sistema híbrido monofásico por meio da *internet*.

Figura 97: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – tela para visualização de dados via *web* do sistema monofásico.

A figura 98 mostra outra forma de visualizar as variáveis do sistema híbrido monofásico, por meio de um *display* conectado à *internet*, que se comunica com o equipamento de aquisição de dados. No momento da foto, na tela desse equipamento consta o valor do estado de carga da bateria.

Figura 98: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – *display* para visualização de variáveis do sistema monofásico.

O sistema híbrido com acoplamento misto visto até aqui se trata de um sistema monofásico, isto é, a minirrede de distribuição de energia possui dois condutores, chamados tecnicamente de fase e neutro. Este tipo de alimentação serve para cargas com tensão nominal⁶ de 127 V ou 220 V. Quando deseja-se conectar outros tipos de cargas, como motobombas para bombeamento de água ou motores de indução para máquinas de gelo, deve-se instalar um sistema trifásico. Esse tipo de sistema distribui a energia por meio de quatro condutores⁷, três fases e um neutro.

Além de possibilitar a utilização de cargas trifásicas, esse tipo de sistema é indicado quando se pretende eletrificar um conjunto grande de domicílios, pois, havendo mais condutores disponíveis, o projeto da minirrede pode prever uma distribuição equilibrada das cargas entre os condutores.

A figura 99 mostra o diagrama elétrico do sistema híbrido trifásico para geração de energia elétrica instalado no LSF-IEE-USP.

⁶ Um sistema monofásico pode funcionar em vários níveis de tensão. Os valores de referência estabelecidos pelo PRODIST são 127 V e 220 V. Na minirrede monofásica do LSF estes dois valores são conseguidos por meio de um transformador.

⁷ Sendo rigoroso, incluindo o condutor terra nessa relação, tem-se um sistema com cinco fios para a configuração trifásica e três fios para a monofásica.

Figura 99: Sistema híbrido para geração de energia elétrica do LSF-IEE-USP – configuração trifásica.

O gerador fotovoltaico de 3 kWp usado para acoplamento c.a. no sistema híbrido trifásico do LSF é mostrado na figura 100. Nota-se que o arranjo fotovoltaico foi instalado em uma área já existente, apenas aproveitou-se esse espaço para convertê-lo em um estacionamento coberto.

Figura 100: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – geradores fotovoltaicos para acoplamento c.a.

Na figura 101 são exibidos os inversores c.c./c.a. de conexão à minirrede, responsáveis pelo acoplamento c.a. no sistema híbrido. Eles foram montados sob o gerador fotovoltaico, fixados na própria estrutura de sustentação dos módulos fotovoltaicos.

Figura 101: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – inversores de conexão à minirrede.

O sistema híbrido trifásico do LSF permite, como já explicado, dois tipos de acoplamento: em corrente contínua e em alternada. As figuras 100 e 101 mostram os equipamentos para o acoplamento c.a. As figuras 102 e 103 mostram os geradores fotovoltaicos para o acoplamento em corrente contínua.

Figura 102: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – geradores fotovoltaicos para acoplamento c.c.

Nota-se na figura 103, no canto inferior direito do arranjo fotovoltaico, a presença de uma célula de referência. É ela quem realiza a medição da quantidade de energia incidente nesse gerador fotovoltaico. Sua extremidade está conectada a um *datalogger* que armazena a cada três segundos o valor existente em seus terminais.

Figura 103: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – outros geradores fotovoltaicos para acoplamento c.c.

Os quadros elétricos usados para acoplamento c.c., os controladores de carga e o banco de resistências para simular uma carga c.c. são mostrados na figura 104.

Figura 104: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – vista geral dos equipamentos para acoplamento c.c.

Um dos quadros elétricos que abrigam os disjuntores, transdutores, resistores *shunt* e DPS utilizados no LSF para efetuar o acoplamento c.c. aparece na figura 105. Os transdutores e *shunts* são utilizados para monitorar as variáveis corrente e tensão dos arranjos fotovoltaicos. Já os outros elementos são recomendados pela norma NBR 5410.

Figura 105: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadro elétrico para acoplamento c.c.

Os controladores de carga, responsáveis por acoplar os módulos fotovoltaicos ao banco de baterias, são mostrados na figura 106. Os quadros elétricos para acoplamento c.c. do sistema híbrido trifásico do LSF permitem a utilização de controladores de carga com ou sem a função de seguimento do ponto de máxima potência. Controladores de carga projetados para seguir o ponto de maior potência do gerador fotovoltaico possuem faixas de tensão diferentes dos projetados para operar com tensões predeterminadas. Por isso, montou-se um quadro para acoplamento c.c. de controladores com seguimento de máxima potência e outro para controladores de carga tradicionais, sem essa funcionalidade.

Figura 106: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – controladores de carga do acoplamento c.c.

A figura 107 mostra o banco de baterias do sistema híbrido trifásico do LSF, referenciado por vezes como sistema de acumulação.

Figura 107: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – banco de baterias e quadro de fusíveis.

Este banco de baterias é composto por 24 elementos, cada um com Chumbo e ácido sulfúrico em seu interior. Cada elemento possui características nominais de 500 Ah e 2 V. Essa disposição fez-se necessária porque o inversor bidirecional opera com tensão de 48 V.

Na figura 108 aparece a parte central (o comando) do sistema híbrido trifásico do LSF. Essa importância deve-se à presença dos três inversores bidirecionais. São eles que controlam todo o funcionamento da minirrede, os níveis de tensão alternada, a frequência, a carga e descarga do banco de baterias, o ângulo de fase do sistema trifásico, enfim, todo o controle do fluxo de energia entre os componentes do sistema híbrido.

Figura 108: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadros elétricos e inversores bidirecionais.

Em períodos com alta produtividade, 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.

Em milhares de comunidades remotas sem acesso a sistemas energéticos que possibilitem o uso da eletricidade 24 horas por dia, a utilização de geradores a diesel é comum, pois possibilita que elas tenham acesso, embora de forma precária, aos benefícios da eletricidade. O desenvolvimento dos motores para caminhões, barcos, maquinários pesados, entre outros equipamentos que funcionam a diesel favoreceram a existência de equipamentos robustos e confiáveis nos dias atuais. Não à toa, a maioria dos sistemas de emergência em hospitais, supermercados e hotéis, ainda que localizados em centros urbanos, são respaldados por geradores a diesel.

Quando integrado a um sistema híbrido, reserva-se o gerador a diesel para as situações de contingência. Na prática, isso significa que o sistema energético funciona com energia solar e o diesel é usado apenas em momentos como, por exemplo, equalização do banco de baterias, sequência de dias nublados, potências instantâneas elevadas, falha nos equipamentos fotovoltaicos, entre outros.

O diesel não é mais estritamente necessário, pois boas práticas de gestão podem fazer funcionar esse sistema energético de maneira bem mais independente do diesel. O fato de tornar necessário o uso do gerador diesel apenas em determinadas circunstâncias, priorizando a energia solar, deslocando-o de elemento central para periférico, é uma importante contribuição dos sistemas híbridos para a redução do ruído e da poluição.

Com o propósito de investigar as questões suscitadas no parágrafo anterior, realizou-se testes de acoplamento de um gerador diesel trifásico de 60 kVA no sistema híbrido do LSF-IEE-USP. A foto desse gerador pode ser visualizada na figura 109, que mostra, no lado esquerdo, o motor movido a diesel e, no direito, o gerador elétrico. O acoplamento mecânico entre os eixos do motor e do gerador ocorre no interior do container que abriga esse conjunto.

Figura 109: Sistema híbrido – gerador a diesel.

As fotos da figura 110 mostram os indicadores de funcionamento do conjunto motogerador. Na primeira foto, no canto superior esquerdo, aparece um painel do motor a diesel, com três mostradores que indicam a temperatura da água no sistema de arrefecimento, o nível de óleo lubrificante, a velocidade de rotação do eixo e o tempo de funcionamento da máquina. Já as outras fotos referem-se ao gerador elétrico, nas quais se pode visualizar os valores de algumas variáveis elétricas como frequência, tensão e corrente. Para fins de operação e manutenção, os mostradores fornecem informações importantes para o operador do sistema, como, por exemplo, a temperatura do motor, que deve ser sempre verificada para evitar danos irreparáveis.

Figura 110: Sistema híbrido – painel para visualização de variáveis do conjunto motogerador diesel.

Uma vez descritos os geradores fotovoltaicos, os inversores c.c./c.a. de conexão à rede, os controladores de carga para acoplamento c.c., as baterias, os inversores bidirecionais e o gerador a diesel, parte-se para a explicação de como todos esses equipamentos são interligados entre si para constituírem, de fato, um sistema híbrido fotovoltaico-diesel-rede elétrica.

A figura 111 mostra o quadro elétrico de entrada para as três fontes de energia em corrente alternada do sistema híbrido: a primeira vinda da saída dos inversores c.c./c.a. de conexão à rede, outra do gerador a diesel e a última da rede elétrica convencional. Percebe-se, nesse quadro elétrico, a presença de contadoras, fusíveis, medidores de energia, disjuntores, DPS, TC⁸, barras de equipotencialização e cabos elétricos que realizam as conexões entre os diversos componentes.

⁸ Transformador de corrente, denotado pela sigla TC, é um dispositivo formado por um transformador toroidal com uma relação de transformação conhecida. Ao passar corrente elétrica por seu interior, induz-se, por variação do campo eletromagnético, uma corrente no secundário do transformador. Esse tipo de dispositivo é bastante útil quando se deseja medir corrente elétrica sem a necessidade de seccionar os cabos que a conduzem.

Figura 111: Sistema híbrido – quadro elétrico de entrada das fontes c.a.

Quando os níveis de tensão de operação dos equipamentos que formam um sistema híbrido são diferentes, torna-se indispensável o uso de um transformador de tensão. Na figura 112 mostra-se o transformador de entrada utilizado na minirrede do LSF-IEE-USP. O seu enrolamento primário, em ligação delta, opera na tensão de 220 V, já o seu enrolamento secundário é ligado em estrela com tensão de 380 V. No sistema híbrido do LSF, esse transformador adéqua os níveis de tensão do gerador a diesel aos níveis de operação dos inversores bidirecionais.

Figura 112: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – transformador de entrada.

Todas as fontes de energia elétrica em corrente alternada do sistema híbrido trifásico foram descritas individualmente; no entanto, como explicado, um benefício do uso de minirredes é a possibilidade de usar todas as fontes disponíveis simultaneamente. Para que isso ocorra, em algum ponto do circuito os condutores elétricos de cada uma das fontes terão que se encontrar, para que ocorram os fluxos de energia entre geradores, inversores, baterias e cargas. Na figura 113 pode-se visualizar o local onde as fontes de corrente alternada se encontram, dentro do quadro elétrico de acoplamento.

Figura 113: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadro de acoplamento entre as fontes.

A figura 114 mostra o diagrama elétrico do quadro de acoplamento usado no sistema híbrido do LSF-IEE-USP. Nota-se a existência de uma unidade de controle que gerencia o acionamento das contadoras referentes às diferentes fontes. Essa unidade de controle também se comunica, via barramento de dados, com cada um dos inversores bidirecionais.

Figura 114: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – diagrama elétrico do quadro de acoplamento entre as fontes.

Fonte: Manual do equipamento *MultiCluster Box 6.3* da fabricante alemã SMA.

Depois de realizado o acoplamento entre as diferentes fontes de energia, deve-se providenciar a distribuição de eletricidade para as cargas conectadas na minirrede. O quadro elétrico de saída mostrado na figura 115 se encarrega de realizar esta função no sistema híbrido trifásico montado no LSF. Nele, podem ser observados os mesmos tipos de equipamentos existentes no quadro de entrada, mas para conectar os consumidores de energia. Esse tipo de quadro é denominado tecnicamente como quadro elétrico de distribuição de energia.

Figura 115: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – quadro elétrico de saída c.a. para as cargas.

Como já explicado, quando os níveis operacionais de tensão elétrica são inapropriados para uma determinada aplicação, deve-se utilizar um transformador de tensão, com o intuito de tornar esses níveis compatíveis. Para tornar possível o acoplamento c.a. dos geradores de energia no sistema híbrido, usou-se um transformador na entrada, antes do acoplamento. De maneira análoga, mas para adequar os níveis de tensão às cargas, instalou-se um transformador na saída, depois do acoplamento, mostrado na figura 116.

Figura 116: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – transformador de saída.

Quando termina a instalação do sistema híbrido, parte-se para a etapa de comissionamento do sistema, exigida pela norma NBR 5410, realizável em qualquer instalação elétrica. Trata-se de avaliar o funcionamento do sistema energético antes de liberá-lo para uso. Essa precaução visa garantir a segurança das pessoas que utilizam as instalações elétricas e evita situações indesejadas, que possam danificar equipamentos de uso final existentes, como computadores, lâmpadas e outros aparelhos.

Para evitar que os próprios aparelhos sirvam de experiência⁹ inicial de funcionamento da minirrede, conectam-se cargas elétricas que simulam as reais, como os bancos de resistores mostrados nas fotos da figura 117.

⁹ Para fazer funcionar um inversor bidirecional deve-se configurá-lo, informando como a minirrede deve operar. Essa configuração conta com dezenas de parâmetros, em um deles é possível estabelecer os níveis máximos e mínimos de funcionamento da tensão na minirrede. Caso, por descuido, o operador tenha configurado uma tensão elevada, como, por exemplo, 240 V em vez de 220 V, equipamentos podem ser danificados.

Figura 117: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – cargas resistivas.

Depois de comprovado o bom funcionamento do sistema híbrido como um todo, observando os níveis de tensão, corrente, frequência e atuação das proteções, para citar algumas das verificações imprescindíveis, iniciam-se os testes com aparelhos comerciais. A partir desta etapa pode-se conectar à minirrede motobombas, equipamentos de dessalinização, máquinas de gelo, frízeres, ventiladores, televisores, lâmpadas, enfim, todo gênero de equipamento.

Durante o comissionamento é indispensável o uso de, ao menos, um multímetro, com capacidade para medição de corrente, tensão e frequência. Quando, no entanto, a intenção é medir e armazenar os valores de cada variável do sistema híbrido, monta-se uma aparelhagem, como a mostrada na figura 118, usada no LSF-IEE-USP para monitoramento e controle da minirrede. Nessa imagem, é possível distinguir os computadores, osciloscópio, *dataloggers* e fiação.

Figura 118: Sistema híbrido trifásico – aquisição de dados.

A estrutura para monitoramento da minirrede permite a medição e registro de diversos parâmetros do sistema híbrido. A grande quantidade de aparelhos que aparece na figura 118 é necessária apenas quando as finalidades são a pesquisa e a demonstração de funcionamento com fins didáticos. O osciloscópio, por exemplo, possibilita a medição de sinais elétricos na fração de microssegundos, bem melhor que a amostragem permitida pelo *datalogger* do fabricante do inversor, que disponibiliza valores integrados na cadência de minutos.

Hoje em dia, os próprios fabricantes de equipamentos disponibilizam meios para que os consumidores possam verificar o funcionamento de seus produtos. A tela para visualização de variáveis do sistema híbrido do LSF-IEE-USP, exposta na figura 119, ilustra como a empresa SMA apresenta os dados medidos por seus inversores, usando um *software* capaz de mostrar as informações de todos os equipamentos conectados pelo barramento de dados ao *datalogger*. As variáveis do sistema híbrido são atualizadas em tempo real na tela do computador e armazenadas no sistema de arquivos do *datalogger*. A compreensão do que aparece na figura 119 serve de subsídio para avaliação da operacionalidade e da disponibilidade energética de um sistema híbrido.

Figura 119: Sistema híbrido trifásico – tela de visualização de dados dos equipamentos SMA.

No LSF, instalou-se um display, como mostra a figura 120, com a finalidade de demonstrar o funcionamento da tecnologia fotovoltaica para visitantes do IEE-USP, além da facilidade operacional para a equipe do laboratório de ver de longe como está o sistema energético.

Figura 120: Sistema híbrido para geração de energia elétrica – *display* para visualização de variáveis.

Tanto os dados mostrados na figura 119 como os exibidos no *display* que aparece na figura 120 são disponibilizados pelos sensores, inversores c.c./c.a. e bidirecionais, todos conectados ao *datalogger* por meio de um barramento de dados RS-485 *ModBus*. Outro fabricante que disponibiliza informações sobre o funcionamento de seus produtos é a empresa *Landys Gyr*, que produz os medidores de energia usados no sistema híbrido do LSF-IEE-USP. Uma tela do *software* que acompanha o seu medidor de quatro quadrantes é mostrada na figura 121.

Figura 121: Sistema híbrido trifásico – tela de visualização de dados dos equipamentos *Landys Gyr*.

A aquisição de dados para os equipamentos fotovoltaicos responsáveis pelo acoplamento c.c. no sistema híbrido do LSF é realizada por meio do já introduzido *datalogger Agilent 34972A*. Na figura 122 pode ser vista a tela do *software* fornecido pela fabricante desse instrumento que possibilita, em tempo real, o acompanhamento dos valores de tensão e corrente elétrica dos geradores fotovoltaicos e controladores de carga.

Figura 122: Sistema híbrido trifásico – tela de visualização de dados dos equipamentos *Agilent*.

Cada equipamento, com seu próprio sistema de medição, com protocolos de comunicação distintos, armazenando uma infinidade de variáveis e disponibilizando essas informações em forma de arquivos eletrônicos. Esse é o contexto de um sistema híbrido composto por equipamentos de diferentes fabricantes, do tipo instalado no LSF. A existência de uma enormidade de dados coletados requer uma sistemática de análise, que permita pelo menos algum tipo de tomada de decisão quanto às estratégias de operação.

Com esse objetivo, o de facilitar tomadas de decisão, foi desenvolvida uma plataforma¹⁰ computacional usando o programa *LabView*, que permite acesso rápido aos arquivos armazenados, de qualquer um dos equipamentos do sistema híbrido, bem como visualização facilitada das variáveis em função do tempo. A figura 123 mostra a tela inicial dessa plataforma, na qual é possível selecionar qual equipamento deseja-se visualizar ou selecionar todos de uma só vez, os que operam no acoplamento c.c. e no c.a. do sistema híbrido de geração de energia do LSF-IEE-USP.

O uso dessa plataforma para análise de dados evita ter que se recorrer a diferentes *softwares*, de cada um dos equipamento de medição. Em vez disso, ela

¹⁰ A plataforma computacional para análise dos dados do sistema híbrido de energia do LSF foi concebida por Alex Renan Arrifano Manito, pesquisador do GEDAE. O desenvolvimento desse *software* foi possível graças à atuação do INCT-EREEA que, por meio da promoção do trabalho em rede, possibilitou a interação entre grupos de pesquisa, no caso o GEDAE e o LSF.

agrega todas as informações de todos os equipamentos e promove a visualização conjunta dos dados em uma mesma tela.

Figura 123: Sistema híbrido trifásico – tela para visualização de dados de todos os equipamentos.

A figura 124 mostra um exemplo de gráfico com o comportamento da irradiância, da potência na saída dos inversores c.c./c.a. de conexão à rede, da frequência da rede de distribuição e da tensão da bateria durante quatro dias consecutivos.

Figura 124: Sistema híbrido trifásico – gráfico operacional 1.

Para facilitar a visualização, a figura 125 mostra uma vista ampliada do gráfico anterior, mas mostrando apenas a frequência da rede de distribuição de energia e a tensão do banco de baterias. Nesse ponto cabe uma observação, que se refere a procedimentos de operação do sistema híbrido. A curva que exibe a frequência da energia entregue às cargas mostra que ela varia entre 59 Hz e 62 Hz. Isso ocorre em razão do método que o inversor bidirecional usa para controle do fluxo de potência na minirrede. A ANEEL, porém, não admite a variação de frequência¹¹ em uma faixa tão ampla; por esse motivo é que devem ser previstas estratégias de operação do sistema híbrido, que não permitam que a frequência da minirrede supere os 60 Hz.

Figura 125: Sistema híbrido trifásico – gráfico operacional 2.

Para elucidar essa importante questão associada aos sistemas híbridos, a da frequência de operação da minirrede, explica-se como esse sistema opera: No início, tudo está desligado, então coloca-se o inversor bidirecional em funcionamento por meio do banco de baterias. O inversor bidirecional converte a tensão contínua das baterias em alternada e libera essa tensão em 60 Hz para o resto do sistema, por meio do quadro de acoplamento. Ao receber sinais de que a minirrede foi energizada, o inversor c.c./c.a., cuja entrada está conectada aos

¹¹ O PRODIST, abreviação para Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica, são documentos elaborados pela ANEEL que padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento de redes de distribuição do Sistema Elétrico Nacional. Nesses documentos, a ANEEL apresenta todos os valores de tensão e frequência de referência. Para a frequência da rede, a faixa permitida para variação é de 59,9 Hz até 60,1 Hz.

módulos fotovoltaicos e a saída ao quadro de acoplamento, conecta-se ao inversor bidirecional como se estivesse na rede elétrica convencional.

A partir desse instante começa a ocorrer um fluxo de energia partindo do gerador fotovoltaico em direção ao inversor bidirecional, que nesse caso passa a atuar como retificador, convertendo a tensão alternada da minirrede em contínua para carregar as baterias. O sistema híbrido começa, então, a operar com as baterias e módulos fotovoltaicos, a energia do Sol vai sendo convertida em eletricidade e injetada no banco de baterias. Se o dia estiver ensolarado, as baterias se carregam por completo rapidamente. Nesse instante, quando a tensão no banco de baterias atinge o valor da tensão de flutuação predeterminada, chega-se a um momento crítico, sob o ponto de vista da operação desse sistema energético.

Como explicado anteriormente, para que a vida útil de uma bateria eletroquímica seja a maior possível, os níveis de tensão de carga e descarga a que ela é submetida devem evitar sobrecarga e descarga profunda. O momento crítico ocorre por existir um valor limite para a tensão de carregamento de uma bateria. No instante em que ela está carregada, não se deve injetar mais eletricidade. Se não houver uma carga que consuma a energia que é disponibilizada pelo gerador fotovoltaico, o inversor bidirecional deve encontrar alguma maneira de evitar que o inversor de conexão c.c./c.a. continue carregando as baterias; por isso, o inversor bidirecional varia a frequência da minirrede na faixa entre 59 Hz e 62 Hz.

Enquanto a frequência gerada pelo inversor bidirecional for menor que 61 Hz, o inversor c.c./c.a. conectado na minirrede injeta toda a energia solar convertida pelos módulos fotovoltaicos no banco de baterias e nas cargas do sistema. Quando o inversor bidirecional identifica que a tensão da bateria chegou no ponto limite de carga, ele começa a alterar a frequência de operação da minirrede, gradativamente, de 61 Hz para 62 Hz. O inversor c.c./c.a. de conexão à rede foi projetado pelo fabricante para reconhecer essas alterações gradativas de frequência e, como resultado, ele começa a diminuir a energia injetada na minirrede, de maneira linear com a frequência.

Quando a frequência da minirrede, comandada pelo inversor bidirecional, atinge o valor limite de 62 Hz, o inversor c.c./c.a. de conexão à rede não injeta mais energia na minirrede. Ele, no entanto, mantém-se conectado a ela, aguardando o

comando do inversor bidirecional que, por meio da alteração da frequência de operação da rede de distribuição, está, constantemente, conduzindo o inversor c.c./c.a. de conexão à rede, fazendo ele injetar mais ou menos energia no sistema híbrido em função da tensão na bateria.

Esse modo que o inversor bidirecional usa para governar o funcionamento do inversor c.c./c.a. de conexão à rede, simplesmente variando sua frequência de operação, tem origem na teoria de controle de máquinas girantes. Para elucidar, utiliza-se o exemplo de um sistema elétrico genérico de grande porte, como o Sistema Interligado Nacional (SIN), governado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS), representado por hidroelétricas e termelétricas conectadas entre si. Esse conjunto de geradores elétricos, conectados entre si por longas linhas de transmissão, forma uma grande rede elétrica, na qual o fluxo de energia ocorre das usinas para as cargas nela conectadas.

A teoria mencionada encontrou um modo de controlar todas essas máquinas girantes que operam interligadas, no sentido de possibilitar que os fluxos de energia ocorram de uma maneira eficiente e segura. Ela considera a existência de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos, que estão relacionados com o tempo de resposta do conjunto mecânico e elétrico da máquina. É dessa complexidade de conexões, de tamanhos e de distâncias, que resultou a solução de usar a própria frequência do sistema elétrico para controlar sua estabilidade. Essa resposta à variação de frequência evita que o inversor c.c./c.a. seja uma fonte de distúrbios e possibilita sua operação sem causar instabilidade na rede elétrica.

Outro benefício que o uso da frequência da rede para controle do sistema aporta está relacionada à estrutura física, uma vez que não há necessidade de uma infraestrutura de comunicação de dados à parte, composta por cabos blindados, eletrodutos e equipamentos para comunicação. Esse suposto controle do sistema híbrido via barramento de dados poderia, em teoria, passar as informações para o inversor c.c./c.a. para que ele diminuísse ou aumentasse sua potência injetada, através de um protocolo de comunicação. Isso, embora possível, aumentaria a complexidade do sistema energético e, ao incluir mais equipamentos no sistema, elevaria a probabilidade de falhas no mesmo.

Por isso, reserva-se o barramento de dados apenas para o tráfego de informações referentes ao monitoramento das variáveis, dados que revelam como está operando o inversor. No barramento de dados do sistema híbrido não trafegam instruções de comando que alteram a potência que o inversor injeta na minirrede. Esse comando, como explicado, acontece pela variação da frequência na rede de distribuição do sistema híbrido, imposta pelo inversor bidirecional. Isso, na prática, implica que uma falha no barramento de dados ocasiona perda de informações, mas o sistema central, que fornece energia para as cargas, continua funcionando.

Pois bem, essa variação da frequência da minirrede entre 59 Hz e 62 Hz tem influência determinante na estratégia de operação da minirrede. A frequência de operação acima de 60 Hz significa desperdício de energia. Acima dessa frequência, o inversor c.c./c.a de conexão à rede não injeta toda a energia disponibilizada pelo gerador fotovoltaico, em vez disso ele começa a reduzir a potência injetada no sistema, isso quer dizer que existe energia solar disponível, mas não se consegue aproveitá-la no sistema híbrido.

Como mencionado, uma promissora aplicação para os sistemas híbridos de geração de energia elétrica é eletrificação de comunidades remotas, distantes das redes convencionais. Nesse tipo de iniciativa, o projeto elétrico do sistema energético deve propiciar o atendimento das demandas desejadas pelos comunitários, mas deve igualmente se preocupar com o uso otimizado da energia. Se não for desse modo, corre-se o risco de se conceber sistemas grandes demais, superdimensionados, mais caros portanto. Logo, nesse contexto, não aproveitar uma energia disponível não seria desejável.

Então, a situação em que a frequência de operação da minirrede é maior que 60 Hz ocasiona perda de energia, na medida em que não se aproveita a energia entregue pelos módulos fotovoltaicos. Portanto, deve-se evitar a operação da minirrede acima desse valor de frequência. Os mecanismos para impedir que a frequência aumente estão relacionados, de certo modo, com a maneira de utilização das cargas. Quando o operador identifica que a frequência está acima de 60 Hz, ele pode ligar uma motobomba para encher uma caixa de água, fazer funcionar uma máquina para produzir gelo, aquecer água para algum processo

produtivo, movimentar máquinas para realizar algum trabalho mecânico, para citar algumas cargas que ele pode conectar à minirrede para aproveitar a energia solar disponível.

Para, portanto, gerenciar de maneira eficiente um sistema híbrido, torna-se evidente, ainda na fase de planejamento da iniciativa de energização, antecipar estratégias de operação adequadas para o despacho das cargas. Prever, por exemplo, o bombeamento de água e a produção de gelo entre meio-dia e duas da tarde pode ser uma boa estratégia para evitar desperdício de energia. Ao contrário, bombear água à noite, por meio da energia extraída do banco de baterias, não é uma boa estratégia. Sendo assim, o funcionamento automatizado de determinadas cargas pode contribuir para tornar o sistema fotovoltaico menos vulnerável à ausência de um operador que verifique a frequência da minirrede.

A manutenção dessa variável o mais próximo possível do valor de 60 Hz é também uma exigência da ANEEL. Soma-se a isso o fato de que a operação de um equipamento de uso final acima da frequência para a qual ele foi projetado, por tempo estendido, além de reduzir sua vida útil, pode provocar danos irreparáveis.

A tabela 18 mostra as variáveis medidas nos ensaios de operacionalidade e disponibilidade energética de sistemas híbridos de energia realizados na Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP.

Tabela 18: Conjunto das variáveis medidas nos ensaios de sistemas híbridos de energia do LSF-IEE-USP.

Variável	Unidade	Medição	Precisão
Irradiação global	Wh/m ²	Estação meteorológica e célula de referência	$\pm 0,05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$
Irradiação difusa	Wh/m ²	Estação meteorológica	$\pm 0,05 \mu\text{V/W.m}^{-2}$
Temperatura ambiente	Graus Celsius (°C)	Estação meteorológica	$\pm 0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Corrente elétrica do gerador fotovoltaico	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do gerador fotovoltaico	Volt (V)	Transdutor de tensão	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica da motobomba	Ampere (A)	Medidor de energia	$\pm 1 \%$

Tensão elétrica da motobomba	Volt (V)	Medidor de energia	$\pm 0,5 \%$
Energia elétrica da motobomba	kWh	Medidor de energia	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica do motor da máquina de gelo	Ampere (A)	Medidor de energia da máquina de gelo	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do motor da máquina de gelo	Volt (V)	Medidor de energia da máquina de gelo	$\pm 0,5 \%$
Energia elétrica do motor da máquina de gelo	kWh	Medidor de energia da máquina de gelo	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica das baterias	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica das baterias	Volt (V)	Inversor bidirecional	$\pm 0,5 \%$
Corrente elétrica do gerador diesel	Ampere (A)	<i>Shunt</i>	$\pm 1 \%$
Tensão elétrica do gerador diesel	Volt (V)	Inversor bidirecional	$\pm 0,5 \%$
Potência elétrica do gerador diesel	Watt (W)	Inversor bidirecional	$\pm 1 \text{ W}$
Energia elétrica do gerador diesel	kWh	Medidor de energia	$\pm 0,5 \%$
Tensão elétrica das cargas	Volt (V)	Inversor bidirecional	$\pm 1 \%$
Potência elétrica das cargas	Watt (W)	Inversor bidirecional	$\pm 1 \text{ W}$
Energia elétrica das cargas	kWh	Medidor de energia	$\pm 0,5 \%$
Amplitude ¹² do sinal elétrico no barramento de dados	Volt (V)	Osciloscópio	Amplitude: 1 V/div Tempo: 500 $\mu\text{s}/\text{div}$

Essa seção apresentou dois sistemas híbridos em funcionamento na Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP. Ambos sistemas foram montados entre os anos de 2009 e 2013. O processo de instalação desses sistemas contou com a colaboração de diversos profissionais, entre eles pedreiros, eletricitas, técnicos e engenheiros. A condução do processo de implementação dessas

¹² A amplitude do sinal na interface RS-485 operando com protocolo de comunicação *ModBus* deve estar entre 4 V e 6 V. Com nível de sinal abaixo dessa faixa, a taxa de erros na transmissão de dados torna-se elevada, o que provoca um tráfego lento de informações no barramento de comunicação.

minirredes constitui a principal contribuição do autor desta tese, o qual teve como propósito incluir uma aplicação fotovoltaica a mais no rol das já existentes no LSF.

Durante os trabalhos de montagem desses sistemas, foi possível observar que os saberes necessários para instalação de um sistema híbrido englobam grande parte dos conhecimentos requeridos para instalação de qualquer sistema fotovoltaico¹³. Essa afirmação torna-se evidente quando se compara a relação dos equipamentos existentes em cada um dos sistemas fotovoltaicos com aquela do sistema híbrido. Nota-se a existência de elementos comuns entre eles, como, por exemplo, módulos fotovoltaicos, inversores c.c./c.a., controladores de carga, baterias, quadros elétricos, disjuntores, DPS, barra de equipotencialização, aterramento, medidores de energia, entre outros. Logo, do ponto de vista pedagógico, as minirredes se mostram como uma boa ferramenta didática para capacitar recursos humanos aptos a atuar na instalação de uma grande variedade de sistemas fotovoltaicos.

Para concepção desses sistemas, estudou-se alguns sistemas híbridos que representam o estado da arte dessa aplicação, como, por exemplo, as minirredes instaladas pelo GEDAE na região Norte do Brasil e as descritas no projeto *Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids*, financiado pela Comunidade Europeia e do qual participam, entre outras, as seguintes instituições: *National Technical-University of Athens* (NTUA), Grécia; *University of Manchester - Institute of Science and Technology* (UMIST), Reino Unido; *Fraunhofer-Institute for Wind Energy and Energy System Technology* (ISET), Alemanha; *Center for Energy & Processes of the Ecole des Mines de Paris* (ARMINES), França (OSIKA, 2005).

O tema sistemas híbridos é vastíssimo, pode-se abordá-lo sob os mais diferentes enfoques, desde os mais técnicos, como a análise de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos ocorridos nas interações entre o gerador diesel e o inversor bidirecional, como os de caráter gerencial, que se ocupam em planejar a instalação e prover os meios para garantir a sustentabilidade da iniciativa. Para um entendimento mais aprofundado das questões pontuadas nesta

¹³ Uma das poucas exceções de sistemas fotovoltaicos, que exigem conhecimentos não abrangidos pelos sistemas híbridos, são os que utilizam conversores de frequência. Neles, exige-se saberes um pouco mais específicos, relacionados às características internas do circuito eletrônico que comanda o conversor de frequência.

tese, recomenda-se a leitura da obra escrita por Pinho (2008), além dos trabalhos disponibilizados na página eletrônica do GEDAE.

3. Qualificação de recursos humanos

Este capítulo trata da qualificação de recursos humanos em energia solar fotovoltaica, de modo a propor uma discussão a respeito do processo formativo de profissionais para atuar nas diversas atividades requeridas a fim de promover o desenvolvimento do setor. No entanto, quando se pensa em qualificação profissional, surgem as seguintes questões:

- Como capacitar os recursos humanos em um universo tão diversificado, que inclui técnicos locais, eletricitas de concessionárias de energia e projetistas, para atuar especificamente em projetos de eletrificação fotovoltaica?
- Como avaliar se os conteúdos curriculares abrangem os requisitos mínimos para a atuação profissional na área, não só no que se refere ao planejamento, instalação, manutenção e gestão de sistemas, mas também às atividades de pesquisa e desenvolvimento, cujos avanços são fundamentais para que a tecnologia seja consolidada no país?
- Como capacitar recursos humanos observando aspectos técnicos e gerenciais de iniciativas de implantação de sistemas fotovoltaicos em um país com grande diversidade geográfica, social, econômica e ambiental?
- Como avaliar se os conhecimentos ensinados foram devidamente aprendidos, observando as questões teóricas e práticas?

Pensar a qualificação de recursos humanos a partir dos questionamentos levantados é fundamental para que sejam disseminados os conhecimentos necessários para implantar de forma sustentável sistemas fotovoltaicos, garantindo que a utilização da tecnologia se expanda.

No Brasil já existem centros tecnológicos e laboratórios de universidades que dominam o conhecimento técnico necessário para pesquisa, implementação e manutenção dos sistemas de energia solar fotovoltaica, como visto mais à frente. Nesses locais são desenvolvidas pesquisas de ponta, produção científica e

informações relevantes para o setor. A necessidade atual é disseminar esses dados de forma didática e capacitar mais pessoas que possam atuar efetivamente na área.

A ideia é que os profissionais que serão qualificados não apenas adquiram um novo conhecimento, mas encontrem nesse setor uma maneira de progredir social e economicamente, além de contribuírem para a consolidação da produção de energia renovável no país. Dessa forma, a qualificação profissional é entendida não só em sua dimensão pedagógica, de caráter exclusivamente técnico, mas também em suas dimensões política e social, enquanto democratização do saber e de criação de possibilidades de melhoria das condições de vida dos envolvidos.

A partir desse ponto de vista, existe a necessidade de que as instituições de pesquisa desenvolvam novas competências além daquelas relacionadas à pesquisa e desenvolvimento ou a serviços técnicos especializados, suas finalidades essenciais. Precisam desenvolver competências relacionadas à eficiência na transmissão do conhecimento tecnológico produzido em âmbito acadêmico, para que possam gerar impactos na sociedade.

Cabe lembrar que a ciência desenvolvida por pesquisadores inseridos em universidades ou institutos de pesquisa públicos depende de recursos do governo, por meio de bolsas, financiamentos e programas de fomento. Assim, a sociedade, por meio do pagamento de impostos, tem disponibilizado recursos a essas instituições para realizar descobertas científicas e tecnológicas. O retorno deste investimento da sociedade pode ser dado tanto em forma de conhecimento aplicado, como por meio do oferecimento de cursos e treinamentos para qualificação profissional da população.

Para compreender o que tem sido feito no âmbito da qualificação em energia solar fotovoltaica, fez-se um levantamento das principais instituições de pesquisa nacionais que atuam no setor. Além disso, investigaram-se ações de escolas técnicas e iniciativa privada para qualificação de recursos humanos em energia solar fotovoltaica. O resultado demonstrou que cada instituição adotou uma metodologia e um procedimento próprio, e essas diferenças podem comprometer a imagem do setor. Portanto é fundamental que se padronize tais iniciativas, promovendo as boas práticas de modo a sustentar a confiança de um mercado consumidor.

Uma das formas para se padronizar o ensino e qualificação dos recursos humanos no segmento fotovoltaico é estabelecer todas as exigências legais e as competências que cada trabalhador do setor precisa ter. Se todas as instituições que trabalham na área tiverem acesso a esse mapeamento das normas, procedimentos e exigências para a instalação de energia solar, o trabalho seguirá um mesmo padrão de qualidade, mesmo que haja algumas diferenças nos procedimentos adotados por cada instituição.

Uma das contribuições desta tese é agrupar e disponibilizar o saber teórico e prático acumulado em 18 anos de existência do LSF-IEE-USP, para que outros setores da sociedade possam ter acesso a esse conhecimento.

3.1. Políticas de qualificação profissional

A discussão sobre a geração de empregos em energia solar fotovoltaica no Brasil ainda é escassa, no entanto tais empregos enquadram-se em um conceito que vem ganhando espaço nas discussões sobre os benefícios sociais e econômicos de uma economia ambientalmente sustentável: o emprego verde. Segundo o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), esse conceito inclui empregos em eficiência energética, tecnologias “limpas”, eficiência na utilização de recursos naturais e em atividades de baixa emissão de gases de efeito estufa.

O relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) intitulado *Nosso Futuro Comum*, de 1987, define desenvolvimento sustentável como aquele que supre as necessidades das gerações presentes sem, no entanto, comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades. O relatório deixa claro que o desenvolvimento sustentável está relacionado não só com a economia, mas também com o meio ambiente e a sociedade. Nesse contexto, a geração de empregos é um aspecto fundamental para o desenvolvimento sustentável de um país.

Essa constatação permite acrescentar novos argumentos ao debate em torno dos benefícios da energia solar, na medida em que os dados sobre o potencial de geração de empregos verdes evidenciam que a adoção de padrões de produção e

consumo mais sustentáveis, do ponto de vista ambiental, não é contraditória com a geração de empregos, com a produtividade, com a competitividade das empresas e com o progresso econômico e social dos países.

Para aumentar a oferta de empregos são necessárias duas abordagens. A primeira é a busca por inovação, que ao trazer o desenvolvimento tecnológico cria empregos estáveis e de alta qualificação. A segunda abordagem é o investimento em qualificação para aumentar o número de trabalhadores. O treinamento dos trabalhadores é um ponto-chave para o desenvolvimento das energias renováveis: além de aumentar o volume de mão de obra, a qualificação aumenta a competitividade e favorece novas oportunidades de investimentos e negócios (ADES, 2013).

O crescimento da oferta de empregos verdes na economia brasileira será ainda maior na medida em que os setores intensivos em energia forem introduzindo tecnologias sustentáveis em seus processos de produção. É possível que ocorra certa substituição de algumas ocupações atualmente existentes por outras mais adequadas aos novos padrões de produção. Entretanto, o número total de postos de trabalho deve crescer, tendo em vista o caráter sempre mais intensivo em mão de obra das tecnologias consideradas “limpas” se comparadas às suas congêneres tradicionais.

Especificamente no que concerne ao setor de energia solar fotovoltaica, pode-se considerar, baseado em informações providas por indústrias, que são criados 10 empregos para cada MW produzido e 33 para cada MW instalado. Estudo realizado sobre o potencial brasileiro estima a geração de mais de 60 mil empregos na área até 2025 (CGEE, 2010).

Além disso, a energia fotovoltaica apresenta um importante benefício referente à criação de empregos, pois muitos dos postos de trabalho estão no local da instalação do sistema, estimulando as economias locais e regionais (ABINEE, 2012). Nesse sentido, deve haver um esforço para ações de qualificação de recursos humanos para instalar e dar manutenção aos sistemas fotovoltaicos em todas as regiões do Brasil, notadamente em locais onde não é viável a extensão da rede elétrica.

Diante do potencial de criação de empregos no setor, há que se pensar de que maneira irá ocorrer a capacitação dos recursos humanos envolvidos. Além do ensino técnico e prático, a qualificação deve contribuir para o cumprimento do Plano Nacional de Qualificação (PNQ) do Governo Federal, no qual se orienta que toda qualificação deve adotar uma metodologia pedagógica que valoriza os indivíduos como sujeitos dotados de saberes e identidades socialmente construídos, com vistas a promover a melhoria das condições de trabalho por meio da educação ao mesmo tempo em que resguarda a qualidade de vida da população (MTE, 2003).

Esse processo deve contribuir para a formação integral (intelectual, técnica, cultural e cidadã) dos trabalhadores; o aumento da probabilidade de obtenção de emprego e trabalho decente; a elevação da escolaridade dos trabalhadores; o aumento da probabilidade de permanência no mercado de trabalho; e a elevação da produtividade, melhoria dos serviços prestados, aumento da competitividade e das possibilidades de elevação do salário ou da renda.

Além disso, deve-se dar relevância aos benefícios econômicos, sociais e culturais efetivamente trazidos por essas ações de qualificação, avaliando a capacidade de consolidar-se como uma política permanente e apta a lidar com as transformações intensas e contínuas que vêm marcando a dinâmica do mundo do trabalho, seja por inovações técnicas e gerenciais, seja por diversificação das formas de trabalho, para propiciar o empoderamento dos sujeitos envolvidos (MTE, 2003).

Fica evidente a importância da transmissão dos saberes científicos, pois se um conhecimento não é utilizado para atender às reais necessidades da sociedade ou para melhorar sua qualidade de vida, deixa de atender à primazia da produção de conhecimento, que é justamente trazer benefícios para todos.

3.2. Iniciativas de qualificação no Brasil

A falta de mão de obra qualificada para atuar no setor é um dos principais obstáculos para a consolidação da energia solar fotovoltaica no país. Os conhecimentos técnicos e científicos sobre energia solar fotovoltaica estão restritos a grupos de pesquisa de universidades ou organizações governamentais, embora a demanda por este tipo de energia “limpa” esteja em pleno crescimento.

Para verificar como se dá a transmissão dos conhecimentos na área, o presente trabalho fez um levantamento das principais instituições de pesquisa do país que contribuem para os avanços da tecnologia, para melhor conhecer as atividades desenvolvidas e a infraestrutura, e pesquisou as iniciativas de qualificação para profissionais da área, para compreender o perfil dos profissionais atuantes no mercado de trabalho.

1) O Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE)¹⁴ é vinculado ao Instituto de Tecnologia e à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará (UFPA). O grupo iniciou suas atividades científicas e tecnológicas no ano de 1994, considerando principalmente o aspecto regional, preservando seu perfil universitário e atuando de maneira integrada com a sociedade.

As principais finalidades do grupo são: desenvolvimento de tecnologias de baixo custo para atendimento de energia elétrica a pequenas e médias cargas, com o uso de energias renováveis; o levantamento de demandas e potenciais energéticos; o desenvolvimento de pesquisa sobre eficiência energética e uso racional, conservação e qualidade de energia; a avaliação e etiquetagem do nível de eficiência energética em edificações; a disseminação do conhecimento por meio de cursos de graduação e pós-graduação, palestras e seminários sobre fontes renováveis de energia e suas aplicações; e a prestação de serviços na forma de consultoria e cursos à comunidade em geral.

O GEDAE sedia o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA) e integra a Rede

¹⁴ Mais informações sobre o GEDAE encontram-se disponíveis em www.ufpa.br/gedae.

Nacional de Eficiência Energética em Edificações (R3E) e a Rede Eletrobrás Procel Solar.

2) O Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (FOTOVOLTAICA-UFSC) desenvolve estudos nas diversas áreas de aplicação da energia solar no Brasil, com foco principal em sistemas fotovoltaicos integrados ao entorno construído e interligados à rede elétrica pública, os chamados Edifícios Solares Fotovoltaicos.

3) O Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) está localizado no *Campus* do Vale, na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Sua estrutura física permite a realização de ensaios dos principais componentes dos sistemas fotovoltaicos e térmicos e a implementação de protótipos, além de servir de constante fonte para o desenvolvimento de trabalhos dos alunos. Entre as áreas de atuação do laboratório destacam-se: instrumentação geral de medidas elétricas, sistemas de ensaios de equipamentos solares e microcomputadores.

O prédio sede do Laboratório de Energia Solar pode ser considerado um protótipo da utilização da energia solar passiva no conforto térmico de edificações; máquina produtora de gelo por ciclo de absorção água-amônia com capacidade de 100 kg/dia; conjunto de coletores com 20 m² para produzir calor para a máquina de gelo; sistema de secagem de grãos por energia solar; sistema de aquecimento de água com energia solar; e pequena instalação fotovoltaica autônoma (500 Wp).

4) O Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA) está sediado em Belém do Pará, mas atua em rede com outros centros de pesquisa do país com o intuito de promover a disseminação de sistemas energéticos apropriados para a Amazônia, bem como a formação de recursos humanos especializados em energia solar e eólica.

5) O Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (Grupo FAE) tem atuado intensamente em pesquisa e desenvolvimento, formação de recursos humanos e prestação de serviços na área da energia solar. Seu trabalho se faz em estreita cooperação com o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e

Municípios (PRODEEM) do Ministérios de Minas e Energia (MME), com o Programa Xingó e com o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), entre outros, na identificação, desenvolvimento e aplicação das tecnologias energéticas adequadas à vasta região do semiárido nordestino.

O Grupo FAE dispõe de uma área de testes em componentes de sistemas solares, completamente acondicionada e instrumentada com sistemas de aquisição de dados e sensores para medidas da radiação solar, medidas elétricas e termohidráulicas. A área destina-se a testes de desempenho de curto e longo prazo de componentes e sistemas solares em condições naturais de iluminação. Além disso, trata-se de um espaço de demonstração da tecnologia solar, aberto permanentemente à visita de estudantes, pesquisadores e público em geral.

6) O Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), da Eletrobrás, promove diversos convênios na área das aplicações fotovoltaicas para estudos e pesquisas em alternativas energéticas, entre elas a solar. Consta de sua estrutura a Casa Solar, parte do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) e do Centro de Aplicação de Tecnologias Eficientes (CATE), construída com o objetivo de divulgar as aplicações da energia solar e as tecnologias de uso eficiente de energia elétrica. Mantém um programa de visitas que atende estudantes, profissionais e público em geral. Na Casa Solar também são realizados cursos voltados para profissionais da área de fontes renováveis de energia e palestras técnicas e educativas.

A pesquisa sobre os cursos na área de energia solar fotovoltaica oferecidos por escolas técnicas foi realizada por meio da *internet* e de ligações telefônicas junto a organizações que tradicionalmente atuam na formação de profissionais de nível técnico, com destaque para SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial), ETE (Escola Técnica Estadual), ETA (Escola Técnica Agrícola), CEFET (Centro Federal de Educação Tecnológica) e IFSP (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo). Abrangeu todos os Estados brasileiros e Distrito Federal, utilizando palavras-chave relacionadas a *cursos de qualificação para instaladores fotovoltaicos, treinamento em energia solar fotovoltaica, capacitação de profissionais em sistemas fotovoltaicos*, além de outras combinações com essas palavras.

Por meio desta pesquisa com enfoque quantitativo e qualitativo, foi possível concluir que as escolas técnicas como SENAI, ETE, ETA, CEFET, IFSP, entre outras, oferecem apenas cursos pontuais. Não existe um programa direcionado para formação de profissionais para o segmento fotovoltaico, como em outras áreas técnicas, que possa contribuir decisivamente para aumentar a quantidade de profissionais para o setor.

Para análise dos cursos oferecidos pela iniciativa privada, utilizou-se a *Pesquisa sobre cursos de capacitação na área fotovoltaica* feita pelo Instituto para o Desenvolvimento das Energias Alternativas na América Latina (IDEAL) em 2012. Trata-se de uma análise detalhada sobre os cursos disponíveis, oferecidos por empresas do mercado e por iniciativas de extensão de universidades privadas. A quantidade de iniciativas demonstra o interesse pelo desenvolvimento da energia solar no país. No entanto, não existe um padrão no que se refere aos conteúdos programáticos dos cursos, demonstrando a necessidade de uma política instrutiva ou programas de certificação para avaliar os aprendizados.

O levantamento realizado não permite uma análise conclusiva sobre os cursos disponíveis, o que demandaria informações mais detalhadas sobre a metodologia de ensino, as atividades práticas e as formas de avaliação, no entanto foi iniciado com o objetivo de melhor compreender o perfil dos profissionais que atuam nas áreas relacionadas com energia solar fotovoltaica, servindo de base para criar padrões e avaliar as competências aprendidas em um possível programa para certificação de instaladores de sistemas fotovoltaicos, como o que está sendo planejado pelo INMETRO e cujos detalhes podem ser conferidos na referência escrita por Zilles et al. (2009).

3.3. Experiências de formação do LSF-IEE-USP

O sucesso de implementação e difusão de uma nova tecnologia para a população, em nosso caso particular a tecnologia fotovoltaica, está relacionado invariavelmente com a satisfação de três condições básicas: estar disponível

comercialmente; facilidade de obtenção de peças de reposição; e existência de pessoal técnico com capacidade para instalar e dar manutenção aos sistemas baseados na nova tecnologia.

Entretanto, as iniciativas de implantação de projetos voltados à eletrificação com energia solar fotovoltaica dos últimos anos, quase como regra, se limitaram ao âmbito de projetos promovidos pela Cooperação Internacional e pelo Governo Federal. Na maioria dos casos, esses projetos não se preocuparam com a questão da formação de pessoal especializado e em criar uma rede de assistência técnica e de manutenção¹⁵.

Esse modelo de implantação de projetos, além de depender inteiramente de recursos externos, apresenta graves lacunas que comprometem sua sustentabilidade, como a questão de não contemplar os recursos necessários para treinamento, operação e manutenção de equipamentos, itens básicos à sobrevivência de qualquer estrutura de geração de energia, o que pode gerar em um breve espaço de tempo o sucateamento de todo o investimento realizado.

Essa ausência de treinamento conduz a muitos insucessos que afetam a difusão e levam ao descrédito sobre a eficácia da tecnologia, causando graves obstáculos à formação do mercado consumidor (ZILLES ET AL., 2009). Uma análise de campo dos projetos implantados revela a existência de instalações mal feitas e de equipamentos mal dimensionados ou mesmo impróprios, situação que tem colaborado para a difusão de um falso conceito, vigente em algumas regiões, de que os sistemas fotovoltaicos não funcionam.

São problemas que ocorrem em decorrência da falta de informação e principalmente em razão da ausência de procedimentos de controle de qualidade e de treinamento. Tal situação ocorre com qualquer nova tecnologia antes de atingir um volume de mercado que a faça mobilizar comitês técnicos nacionais e organismos de defesa ao consumidor. Acrescenta-se a este problema a omissão de

¹⁵ Para atuar como comerciante de equipamentos, o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) exige a constituição de uma pessoa jurídica, que se responsabilize pelos equipamentos vendidos aos consumidores. A lista de empresas oficialmente registradas junto ao INMETRO, aptas a atuarem na comercialização de equipamentos fotovoltaicos no Brasil, pode ser consultada em sua página eletrônica. Antes de realizar qualquer tipo de compra, um bom alvitre seria verificar se a empresa fornecedora figura na relação do INMETRO. Isso é importante para assegurar os direitos conquistados pelo código de defesa do consumidor, que regulamenta questões relacionadas às garantias e trocas do produto em caso de defeito.

informação de experiências mal sucedidas, que de modo geral não são discutidas nos encontros técnicos internacionais, perdendo-se assim a possibilidade de aprender com erros do passado.

Como explicitado anteriormente, a Unidade de Capacitação surgiu para atender às necessidades de formação de pessoal para trabalhar com energia solar fotovoltaica e responder às lacunas estruturais da área. As experiências do LSF têm obtido resultados de grande relevância, reunindo esforços para garantir a sustentabilidade dos projetos após a saída das equipes de implantação.

A intenção deste trabalho de doutorado é reunir esse conhecimento acumulado, não apenas a parte meramente técnica, mas também os desdobramentos científicos e sociais do trabalho da Unidade de Capacitação.

É importante ressaltar que o trabalho do LSF-IEE-USP tem uma característica de priorizar pesquisas que tenham um alto valor social agregado. Entre elas estão estudos relacionados com três tipos de aplicações desenvolvidas para a produção de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos: bombeamento de água, dessalinização de água e produção de gelo, importantes usos para comunidades isoladas, periféricas e com recursos econômicos escassos.

A primeira pesquisa que vale destacar o resultado é a tese defendida por Paulo Marcos Noronha Serpa em 2001, em que o autor apresenta a metodologia de planejamento participativo utilizada no processo de mudança tecnológica ocorrido em comunidades caiçaras dentro de projetos desenvolvidos pelo LSF-IEE-USP. Tal metodologia permitiu a avaliação constante e participativa do processo em desenvolvimento e, propiciando o diálogo entre os agentes da mudança e as comunidades envolvidas, evitou as situações de resistências que levaram ao fracasso outros projetos de mudança tecnológica (SERPA, 2001).

A dissertação de mestrado, defendida em 2007 pelo autor desta tese de doutorado, constou de uma pesquisa de campo, na qual foram acompanhadas a implantação e a gestão de um projeto de implantação de 23 SFDs em uma comunidade ribeirinha do Estado do Amazonas. O projeto foi desenvolvido no

contexto da Resolução ANEEL nº 83¹⁶ de 2004 e utilizou a configuração padrão mínima estabelecida. A metodologia adotada foi a mesma utilizada em outras experiências realizadas pelo LSF-IEE-USP e compreendeu a participação de todos os envolvidos no planejamento e na execução das atividades (MOCELIN, 2007).

Então, com base nessa metodologia participativa, as atividades de gestão foram focadas na integração da tecnologia fotovoltaica ao cotidiano da comunidade, com transferência aos usuários e técnicos locais dos procedimentos técnicos e organizacionais necessários para garantir a qualidade do fornecimento de energia elétrica pelos SFDs. O objetivo foi promover a relativa autonomia da comunidade, baseada nas potencialidades e recursos locais disponíveis, em relação ao funcionamento e gestão dos sistemas.

A introdução da tecnologia fotovoltaica promoveu importantes transformações na comunidade. A implantação de um sistema que tem por base uma fonte de energia acessível e inesgotável promoveu uma relativa autonomia no que diz respeito à utilização de eletricidade, pois apesar de já utilizarem energia proveniente de um gerador a diesel, muitas vezes a comunidade se tornava refém de interesses políticos, muito explorados em época de eleição, com promessas de doação de geradores e fornecimento mensal de diesel pela prefeitura.

A leitura de outros trabalhos defendidos na Unidade podem beneficiar o aprendizado de diferentes aplicações para sistemas fotovoltaicos, pois constam principalmente de contribuições a partir de análises de campo. Seguem resumos de algumas teses para exemplificar as linhas de atuação do LSF.

A tese intitulada *Geração distribuída de eletricidade: inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no Estado de São Paulo*, datada de 2002, já tratava de sistemas fotovoltaicos conectados à rede motivada por diversos países que investiam na tecnologia solar fotovoltaica. Ela relata que as experiências mais antigas costumavam utilizar o conceito de grandes centrais geradoras, capazes de produzir grandes pacotes de energia. Essa forma de projetar os sistemas

¹⁶ A resolução ANEEL 83/2004, que tratava apenas de sistemas individuais, dentre os quais se destacavam os sistemas fotovoltaicos domiciliares, foi atualizada pela resolução ANEEL 493/2012 que, além dos sistemas fotovoltaicos individuais, regulamenta o uso de sistemas híbridos. Os valores de referência das duas resoluções ANEEL foram mantidos, portanto, um sistema fotovoltaico que foi instalado de acordo com a resolução 83/2004 passa, automaticamente, a se enquadrar na resolução 493/2012.

fotovoltaicos decorria da maneira tradicional de se planejar a expansão do setor elétrico, na qual se buscava a utilização de fontes energéticas com grandes ganhos de escala. Dessa forma, quanto maior a planta geradora, menor era o custo da energia produzida. É dentro desse contexto que as primeiras experiências de conexão de sistemas fotovoltaicos à rede foram concebidas (OLIVEIRA, 2002).

Tal tese, de autoria do pesquisador Sérgio Henrique Ferreira de Oliveira, demonstrou que não há ganho de escala significativo na instalação de grandes centrais fotovoltaicas. Para diminuir o custo de geração dos sistemas fotovoltaicos é necessário, entre outras coisas, aumentar o mercado da tecnologia e, para isso, não é preciso necessariamente instalar grandes centrais. Basta, por exemplo, que seja instalado um grande número de pequenos sistemas, gerando eletricidade de forma distribuída, ação que, inclusive, aproveita melhor as vantagens decorrentes das características intrínsecas da tecnologia (OLIVEIRA, 2002).

Em sua tese de doutorado, defendida em 2002, Rosana Rodrigues dos Santos parte da observação em campo de experiências de Eletrificação Rural Fotovoltaica Domiciliar (ERFD) para fazer uma análise e sistematização dos aspectos considerados relevantes ao funcionamento adequado e à longevidade dos programas. A partir dessa análise, a autora caracterizou um atendimento típico com sistemas fotovoltaicos domiciliares através de estimativa realista de consumo, procedendo à definição de níveis de serviço fotovoltaico e dimensionamento adequado dos equipamentos dos sistemas fotovoltaicos para cada um dos níveis de serviço propostos (SANTOS, 2002).

A autora sistematizou os procedimentos para a eletrificação rural no Brasil de forma a fornecer a seus possíveis agentes implementadores (concessionárias, permissionárias, prefeituras, organizações não governamentais) e reguladores (ANEEL) elementos para incrementar as chances de sucesso e, por conseguinte, sua inclusão definitiva no rol de alternativas de atendimento elétrico rural. A caracterização do atendimento com SFD e a estruturação de procedimentos técnicos, além de responderem aos requisitos levantados em campo, são tratados de forma a servir de base para uma estrutura de gestão e operação de programas de ERFD afinados com o contexto regulatório brasileiro.

Federico Morante Trigoso, em sua tese defendida em 2004, intitulada *Demanda de energia elétrica e desenvolvimento socioeconômico: o caso das comunidades rurais eletrificadas com sistemas fotovoltaicos*, propõe procedimentos para dimensionar sistemas fotovoltaicos que consideram os múltiplos fatores que exercem forte influência no comportamento do consumo de populações. Estes foram denominados fatores técnicos, gerenciais, psicológicos, geográficos, demográficos, socioculturais e econômicos (MORANTE, 2004). Tal consumo, conclui o autor, é caracterizado pela função de distribuição Gama, que em sua essência indica que “muitas pessoas consomem pouco e poucas pessoas consomem muito”.

Outra tese de doutorado defendida no âmbito do programa de pós-graduação do IEE-USP foi a da pesquisadora Maria Cristina Fedrizzi, que fez um levantamento e análise dos principais problemas relacionados ao abastecimento de água de populações rurais remotas, com a utilização da tecnologia de bombeamento solar fotovoltaico. Ela observou que a ocorrência de problemas estava, em grande parte das vezes, relacionada a outros parâmetros que não à confiabilidade da tecnologia propriamente dita. Questões como o tipo de concepção e implementação do projeto, a forma de introdução do sistema na comunidade, o grau de organização e informação dos usuários, além das características socioculturais da população beneficiada têm grande influência na utilização e durabilidade do empreendimento (FEDRIZZI, 2003).

O que se pode observar nas teses resumidas acima é que em projetos de implementação de qualquer tipo de sistema fotovoltaico, as interações dos agentes de eletrificação com os comunitários devem acontecer no intuito de facilitar a apropriação da tecnologia por parte da comunidade. Para tal fim, é preciso planejar atividades tais como: capacitação continuada aos usuários; fundo de operação e manutenção; constituição de almoxarifado local; seleção e treinamento de técnicos locais; implementação de uma logística de atendimento aos usuários; estabelecimento de uma rotina de manutenção preventiva e corretiva e, por fim, monitoramento do desempenho dos sistemas e da sua adaptabilidade ao meio.

Embora os próprios moradores possam atuar como técnicos locais e como fornecedores de alguns materiais, é necessário pessoas capacitadas nesse tipo de

tecnologia nas principais cidades ou nas sedes dos municípios. A Resolução ANEEL 493/2012 determinou as responsabilidades de instalação e gestão para as concessionárias de energia elétrica locais. Dessa forma, a contratação de técnicos passou a ser obrigação dessas instituições. Ainda assim existe a dificuldade de atender a populações remotas devido às grandes distâncias envolvidas. Nessas situações, a capacitação de comunitários para atuarem como técnicos locais pode ser uma alternativa que torna as atividades de gestão dos sistemas mais viáveis.

Para finalizar, selecionaram-se algumas fotos do acervo do LSF com o propósito de apresentar elementos que possam contribuir para a qualificação de recursos humanos. Sendo assim, encerra-se esta seção apresentando, na forma de memória fotográfica, algumas experiências nas quais houve participação dos pesquisadores do LSF.

A primeira foto dessa sequência mostra o professor Roberto Zilles no município de Benjamim Constant, Amazonas, em 1998, explicando as características do sistema fotovoltaico que viria a ser instalado nessa comunidade pertencente ao povo Ticuna. Observa-se a presença de recursos didáticos utilizando objetos reais, tais como garrafas contendo querosene (fazendo uma alusão a toda forma de iluminação preexistente), baterias eletroquímicas e caixa de ferramentas para uso com o novo sistema.

Figura 126:Experiências de formação do LSF – aula em comunidade no Alto Rio Solimões-AM.

A figura 127, por sua vez, mostra os moradores de uma comunidade no Vale do Ribeira, Ilha do Cardoso, Estado de São Paulo, sendo incentivados a interagir com um quadro elétrico, que foi posteriormente instalado na casa deles.

Figura 127: Experiências de formação do LSF – aula prática no Vale do Ribeira-SP.

A figura 128 retrata um momento em que estão sendo dadas explicações de como funciona um módulo fotovoltaico, para moradores de um assentamento rural no município de Presidente Bernardes, Oeste Paulista, em 1999.

Figura 128: Experiências de formação do LSF – aula em assentamento rural no Pontal do Paranapanema.

A figura 129 mostra o mesmo assentamento, mas destaca uma atividade prática, na qual os moradores estão realizando conexões elétricas nos módulos, sendo estimulados a manusear ferramentas essenciais para a instalação e manutenção do sistema que estava sendo proposto.

Figura 129: Experiências de formação do LSF – aula prática de conexão de módulos fotovoltaicos.

A figura 130 mostra outro momento de treinamento, em uma comunidade ribeirinha localizada no município de Uarini, região do Médio Rio Solimões, Amazonas, no ano de 2005. Nota-se a presença de *kits* didáticos com lâmpadas, usados como acessórios para auxiliar nas explicações de funcionamento das instalações elétricas internas da casa. O manuseio de instrumentos de medição, como multímetros, também auxilia a explicar conceitos como tensão, corrente e frequência elétrica.

Figura 130: Experiências de formação do LSF – aula com *kits* didáticos em comunidade no Médio Rio Solimões-AM.

A figura 131 mostra alguns momentos do curso de capacitação de técnicos locais na mesma comunidade. Nota-se vários recursos didáticos, como cartazes, *kits*, ferramentas, instrumentos de medição e equipamentos reais, utilizados para facilitar a transferência dos conhecimentos sobre a tecnologia fotovoltaica, que possibilitam aos comunitários se sentirem mais próximos dos sistemas instalados em seus domicílios.

Figura 131: Experiências de formação do LSF – aula prática com comunitários.

A figura 132 mostra o uso de outro *kit* didático, utilizado para explicar como funciona um sistema fotovoltaico de conexão à rede elétrica de uma concessionária de energia. Na foto dessa figura, aparece uma turma de graduação do curso de engenharia elétrica da Escola Politécnica da USP, observando a demonstração de funcionamento de um sistema fotovoltaico.

Figura 132: Experiências de formação do LSF – aula com *kit* didático para alunos de graduação da USP.

A figura 133 mostra outro momento com os alunos, direcionado para as explicações sobre sistemas fotovoltaicos domiciliares a partir de um protótipo de SIGFI13 existente na Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP.

Figura 133: Experiências de formação do LSF – aula prática para alunos de graduação da USP.

A figura 134 mostra uma demonstração de funcionamento, na cidade de Arequipa, no Peru, durante o XVI Simpósio Peruano de Energia Solar, realizado em novembro de 2009. Observa-se na foto que o *Kit* de conexão à rede é usado como apoio nas explicações sobre o comportamento de um sistema conectado à rede. Uma funcionalidade desse *kit* é a possibilidade de conectá-lo a um computador, o que permite a visualização de vários parâmetros da geração fotovoltaica como tensão, corrente, frequência, potência e energia, todos eles disponibilizados pelo circuito de medição existente no interior do inversor c.c./c.a. de conexão à rede pertencente ao *kit*.

Figura 134: Experiências de formação do LSF – aula com *kit* didático na cidade de Arequipa no Peru.

Na foto da figura 135 aparece uma turma de estudantes recebendo informações de como ocorre a transformação da radiação solar em eletricidade, usando para esse propósito um gerador fotovoltaico, instalado em uma área externa, conectado ao *kit* de conexão à rede, o qual é exibido dentro da sala de aula na foto da figura 134.

Figura 135: Experiências de formação do LSF – aula prática para alunos na cidade de Arequipa no Peru.

As fotos 126 até 135 ilustram algumas ações educativas em que membros do LSF atuaram, disseminando boas práticas e demonstrando que a tecnologia fotovoltaica funciona, é confiável e está cada vez mais competitiva. Evidencia-se que o uso dos tais *kits* didáticos auxiliam nesse processo, por serem úteis e objetivos, por cumprirem seu papel de modo universal com simplicidade e por conseguirem atingir diferentes públicos. A figura 136 mostra dois deles, que reproduzem as instalações elétricas internas de uma casa, permitindo ensinar aos técnicos locais procedimentos de medição de tensão e corrente elétrica nas tomadas e lâmpadas como se estivessem em um domicílio.

Figura 136: Experiência de formação do LSF – kits didáticos para instalações elétricas.

Na figura 137 são mostrados acessórios empregados em atividades de treinamento. A foto é de uma ação em comunidade que estava sendo eletrificada por meio da energia solar, na qual foram empregados outros recursos multimídias, como retroprojetores, computadores e vídeo aulas, que não aparecem nas fotos.

Figura 137: Experiências de formação do LSF – kits didáticos para sistemas fotovoltaicos domiciliares.

As fotos da figura 138 mostram diferentes montagens para o mesmo kit. Eles foram instalados de diferentes maneiras para facilitar o seu transporte para os

locais onde foram apresentados. As fotos superiores mostram as disposições utilizadas em suas aparições no LSF e na cidade de Arequipa, enquanto as inferiores mostram esse *kit* na ocasião da Oficina de Trabalho sobre Sistemas Fotovoltaicos para Microrredes Isoladas e Interligados à Rede Elétrica, realizada em Belém, no Estado do Pará, em fevereiro de 2010. Detalhes sobre o funcionamento desse *kit* de conexão à rede podem ser encontrados na publicação Pinto Neto et al. (2010).

Figura 138: Experiência de formação do LSF – kits didáticos para sistemas fotovoltaicos conectado à rede elétrica.

Outras experiências de capacitação¹⁷ e divulgação da tecnologia fotovoltaica são realizadas frequentemente nas dependências da Unidade de Capacitação Tecnológica do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do IEE-USP. Entre elas, destaca-se a visita constante da sociedade, formada por um público diversificado,

¹⁷ Cita-se, como exemplo de outra experiência na qual a estrutura do LSF-IEE-USP foi utilizada para capacitação de recursos humanos, as aulas ministradas no curso colaborativo de engenharia ambiental, intitulado *The Global Challenges of Energy Production in the Coming Decades*. Esse curso é oferecido pela *Harvard University* em parceria com a Universidade de São Paulo. No ano 2013, essas instituições promoveram a realização de algumas aulas desse curso no Brasil, sendo que um dos locais escolhidos para a realização de visitas técnicas e demonstrações de funcionamento de sistemas fotovoltaicos foi o LSF.

composto por alunos do ensino médio, empresários, professores, todos interessados no funcionamento da tecnologia e em sua viabilidade. Estar acessíveis para atender a esse público, diariamente, é uma importante contribuição do LSF para promover a disseminação da energia solar.

3.4. Conteúdos curriculares

Uma das contribuições desta tese é reunir, disponibilizar e socializar grande parte do conhecimento acumulado em 18 anos de diferentes pesquisas feitas na Unidade de Capacitação do LSF-IEE-USP. Catalogar quais procedimentos técnicos foram utilizados nos testes da Unidade e quais foram os resultados práticos disso constitui um dos objetivos. A pretensão é gerar um documento que contenha subsídios para os interessados em aprender um pouco mais sobre as diferentes aplicações dos sistemas fotovoltaicos, os procedimentos técnicos e as exigências legais.

As informações apresentadas são resultados de diversas pesquisas e testes feitos por diferentes pessoas ao longo da existência do laboratório. O maior objetivo é consolidar, em um documento conciso, informações práticas, simples e precisas sobre os resultados das pesquisas realizadas, bem como os procedimentos técnicos utilizados nos testes realizados nos laboratórios, disponibilizando assim os conhecimentos acumulados sobre os diferentes tipos de aplicações da energia fotovoltaica. Sem a intenção de ser conclusivo com relação a procedimentos e métodos, a elaboração deste trabalho é um passo inicial para um exercício permanente de difusão da tecnologia, em especial em um cenário de rápidos avanços tecnológicos e mudanças sociais.

O trabalho oferece um mapeamento de diferentes exigências, normas e procedimentos para que cada sistema, cada instalação de energia solar, seja feita de forma correta e que esses conhecimentos possam ser utilizados para promover a formação de pessoal capacitado.

A proposição de uma ementa de conteúdos que contemple as questões discutidas acima e que proporcione uma formação compatível com as atribuições

profissionais requeridas pelo setor de energia solar fotovoltaica deve abranger tanto conhecimentos teóricos quanto práticos. A profundidade de tais conhecimentos depende do grau de interesse de atuação profissional. As orientações contidas nas ementas podem ser estendidas às diversas aplicações da energia solar fotovoltaica, bastando que sejam consideradas as características específicas de cada uma delas.

3.4.1 Planejamento e gestão de projetos

Um planejamento que garanta a continuidade dos benefícios promovidos pelos sistemas fotovoltaicos durante toda a vida útil do projeto deve ser feito em escala local e com participação social, de modo que os sistemas possam sobreviver à falta de suporte técnico consolidado, como os existentes nos sistemas centralizados dos meios urbanos.

O planejamento deve se preocupar com a coleta e organização das informações gerais, patrimoniais e operacionais, cujas inter-relações constituem a gestão das informações do projeto. Em termos de perspectivas futuras, essas informações serão úteis para a concessionária ou permissionária que assumir a responsabilidade dos sistemas, no que se refere ao controle patrimonial, à logística de atendimento aos usuários e à situação dos sistemas fotovoltaicos na sua área de concessão.

Nesse memorial documental da iniciativa devem constar as atas das reuniões, as quais descrevem os compromissos e as responsabilidades assumidos pela comunidade atendida e pela equipe de implementação, bem como o prontuário elétrico da instalação. Constam desses relatórios o mapeamento espacial da comunidade, com a localização dos domicílios eletrificados ou a eletrificar e das construções de uso comunitário, tais como centro comunitário, escola e igreja.

O prontuário de cada instalação deve conter a planta baixa da residência, com a localização dos pontos de iluminação e tomadas, a carga instalada em cada domicílio, os procedimentos de manutenção preventiva e outras observações pertinentes às instalações.

A situação antes da eletrificação fotovoltaica também deve ser documentada, observando a existência de outros tipos de geração de eletricidade (como minirrede de distribuição de energia elétrica) e das cargas conectadas em baterias e geradores individuais. Essa documentação do projeto é essencial para o compartilhamento das informações entre as instituições envolvidas e serve como base de dados para otimizar os mecanismos de gerenciamento da eletrificação.

Para exemplificar a importância da documentação em uma iniciativa de eletrificação, comenta-se sobre uma avaliação realizada pelo Tribunal de Contas da União sobre o *Programa Energia das Pequenas Comunidades*. Nela foi constatado o descontrole patrimonial dos equipamentos. Essa avaliação cita como efeito e causa desse descontrole a não existência de um cadastro com a situação dos equipamentos instalados, configurando a importância de um atendimento pontual e disperso com necessidade de estrutura capilar de acompanhamento, manutenção e documentação (TCU, 2003).

É importante prever um estoque de peças para reposição dos principais componentes dos sistemas a serem instalados. A quantidade de peças de reposição deve ser proporcional ao número de sistemas instalados e deve existir uma forma de manter os gestores do projeto informados sobre a situação do estoque. É preciso um controle do material e dos motivos da substituição, bem como de uma logística para recolher o material inutilizado e acondicioná-lo em recipientes adequados, para reciclagem ou destinação final, evitando-se, assim, a contaminação do meio ambiente.

Para garantir a sustentabilidade dos projetos e reduzir os custos de operação e manutenção, é necessário contar com os recursos existentes na localidade ou em suas proximidades. Isso requer o estabelecimento de um mercado local com a capacidade de fornecer, com qualidade e confiabilidade, os diversos materiais a serem utilizados. No futuro, as próprias concessionárias de eletricidade da localidade devem ser as responsáveis pelo fomento e estabelecimento dessas condições, como já é previsto em lei.

O planejamento de projetos, especialmente em comunidades dispersas, deve prever a realização de cursos sobre sistemas fotovoltaicos para a comunidade atendida. Esse treinamento refere-se a uma série de atividades de capacitação

dirigidas aos comunitários interessados em aprimorar seus conhecimentos em eletricidade. Esses cursos têm a finalidade de capacitar técnicos locais a realizarem a rotina de manutenção preventiva dos sistemas fotovoltaicos, o controle do almoxarifado, o suporte aos demais usuários que necessitarem de auxílio técnico e o recolhimento do material inutilizado.

O planejamento dos projetos deve prever essas atividades educacionais, como os cursos de capacitação que aproveitem todas as potencialidades dos moradores, adaptem-se à realidade local e, dentro do possível, fomentem a inclusão dos recursos que a comunidade oferece. A linguagem utilizada não deve incluir palavras técnicas desconhecidas e, fundamentalmente, os conceitos devem ser relacionados com atividades, objetos ou situações do dia-a-dia dos moradores. Também é muito importante passar as informações utilizando meios físicos de fácil manipulação, tangíveis e palpáveis, evitando abstrações (MORANTE ET AL., 2006).

A capacitação de técnicos locais e a constituição de um almoxarifado de reposição de peças em caso de comunidades dispersas possibilitam um esquema de execução descentralizada das rotinas de manutenção preventiva e, na medida do possível, corretiva. Contudo, esse modelo de gestão não elimina a necessidade de um suporte técnico externo, pois a cadeia de suprimentos requerida para a operação dos sistemas fotovoltaicos vai além dos recursos locais disponíveis.

O atendimento aos usuários requer tanto a existência de recursos humanos qualificados quanto a disponibilidade de infraestrutura. Esses requerimentos e suas inter-relações implicam a necessidade de uma logística de atendimento. A logística de atendimento refere-se à organização das pessoas e dos meios utilizados para garantir a operação e a manutenção dos sistemas fotovoltaicos instalados, ou seja, é um instrumento para assegurar o padrão de qualidade e a continuidade do fornecimento de energia elétrica, conforme determina a Resolução ANEEL nº 493 de 2012.

Os fatores envolvidos na logística de atendimento ao usuário são: i) no que tange ao fluxo dos materiais, trata da provisão, da aquisição, do armazenamento, do transporte, da distribuição, da reparação e do recolhimento dos materiais inutilizados, além da localização e especificidade do ferramental; ii) quanto aos fins

operacionais, refere-se ao planejamento e à execução da manutenção preventiva e corretiva, ao monitoramento do desempenho dos sistemas, à coleta de dados, à leitura de consumo e ao recebimento de pagamentos.

Os agentes do suporte técnico precisam de habilidades específicas, tais como possuir conhecimentos técnicos sobre os sistemas e sobre o ferramental apropriado, saber se relacionar com os usuários e dar explicações claras e pertinentes sobre o uso dos sistemas fotovoltaicos, bem como possuir conhecimento das condições locais, para que possam se deslocar com rapidez e segurança na região.

O atendimento aos usuários de comunidades remotas da Região Amazônica, por exemplo, requer um planejamento minucioso, pois as distâncias são muito grandes e o meio de transporte viável é o fluvial. Assim, a infraestrutura disponível para suporte deve contar com piloto, barco, combustível, ferramentas e documentação (identificação do consumidor/patrimônio, coordenadas de localização, etc.). A logística de atendimento tem influência nos custos operacionais de um sistema fotovoltaico e, portanto, deve ser planejada visando à redução de custos operacionais.

No âmbito das concessionárias, a logística de atendimento aos usuários requer a incorporação, em sua estrutura operacional, de um sistema de atendimento às chamadas com recursos humanos capazes de fornecer informações aos usuários sobre o funcionamento dos sistemas, para evitar deslocamentos desnecessários da equipe técnica. O sistema de atendimento deve coletar informações sobre que tipo de problema ocasionou a falha e repassar essas informações para a equipe de campo, para que esta possa realizar ações dirigidas e agilizar a manutenção dos sistemas. Ainda, deve ser capaz de agregar dados sobre os problemas ocorridos em localidades próximas, a fim de otimizar o atendimento.

Com a normatização cada vez mais rigorosa a que são submetidos os sistemas fotovoltaicos em relação ao controle de qualidade dos componentes, é possível uma previsão otimista em relação ao funcionamento dos sistemas.

As distâncias envolvidas entre a comunidade e as sedes dos municípios vizinhos torna de fundamental importância a efetivação de uma manutenção em nível local, sendo necessária a capacitação de técnicos locais para o conhecimento

dos principais componentes do sistema fotovoltaicos instalado, do ferramental apropriado e do estoque de reposição de peças. O estabelecimento de uma rotina de inspeção e manutenção preventiva dos equipamentos é fundamental para garantir uma operação eficiente e reduzir a necessidade de manutenções corretivas.

Como visto na seção anterior, um sistema fotovoltaico pode ser concebido na topologia de sistema isolado ou conectado em uma rede de distribuição de eletricidade. A escolha entre cada uma destas configurações determina práticas distintas de gerenciamento dos sistemas durante toda a vida útil do empreendimento. Esta seção descreve e compara as práticas de gestão para cada uma das configurações e apresenta os requisitos necessários para a gestão de sistemas fotovoltaicos. As tabelas que seguem não são exaustivas e os seus conteúdos servem apenas como ponto de partida para a discussão sobre os critérios de decisão entre tais configurações.

A tabela 19 mostra uma comparação entre as diferentes configurações para sistemas fotovoltaicos de bombeamento de água, isolado usando conversor de frequência e conectado à minirrede.

Tabela 19: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água.

Atividade	Motobomba conectada no sistema isolado	Motobomba conectada no sistema híbrido
Montagem do arranjo fotovoltaico	Arranjo exclusivo e centralizado.	Arranjo compartilhado, centralizado ou distribuído.
Instalação elétrica	Montagem do quadro elétrico com CF e parametrização do CF.	Montagem do quadro elétrico convencional e extensão de um ramal da minirrede.
Instalação hidráulica	Convencional.	Convencional.
Obra civil	Montagem da estrutura de sustentação do arranjo fotovoltaico exclusivo.	Se a minirrede já existir, deve-se realizar a obra civil para a fixação dos postes e condutores elétricos até o quadro elétrico da motobomba
Recursos humanos	Conhecimentos em instalações elétrica prediais, montagem de quadro elétrico com conversor de frequência e parametrização de	Se a minirrede já existir, conhecimentos em instalações elétrica prediais. Se a minirrede não existir,

	conversor de frequência.	conhecimentos em parametrização de inversores bidirecionais, instalações de baterias, geradores a diesel, inversores c.c./c.a. de conexão à rede, controladores de carga e rede de distribuição de energia elétrica.
Dimensionamento	Considera a acumulação de energia na forma de energia potencial gravitacional, armazenando água a uma certa altura, e o perfil de consumo de água preexistente.	Considera a acumulação eletroquímica no banco de baterias, o regime de funcionamento do gerador diesel e os perfis de consumo de eletricidade e de água preexistentes.
Bombeamento de água	Somente diurno, dependente da irradiância.	Diurno ou noturno.
Manutenção elétrica	Troca do conversor de frequência e parametrização.	Componentes do sistema híbrido e rede de distribuição de energia elétrica.
Manutenção hidráulica	Convencional.	Convencional.
Manutenção nas instalações	Limpeza do arranjo fotovoltaico dedicado.	Limpeza dos diferentes arranjos fotovoltaicos, poda de árvores no percurso da rede de distribuição e manutenção no gerador diesel.
Logística de suprimentos	Infraestrutura para adquirir e instalar conversores de frequência e motobombas trifásicas.	Infraestrutura para adquirir e instalar os diversos componentes do sistema híbrido e motobombas. Recursos para a aquisição e transporte de óleo diesel.
Custo operacional	Sem custo, o sistema funciona de maneira autônoma, bombeando água para a caixa de água enquanto houver energia solar suficiente.	Consumo de óleo diesel, troca dos filtros do gerador diesel e troca das baterias a cada ciclo de vida. Custos logísticos e de mão de obra para o suprimento de óleo diesel.

A tabela 20 mostra uma comparação entre as diferentes configurações para sistemas fotovoltaicos de dessalinização de água, isolado e conectado à minirrede.

Tabela 20: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos para dessalinização de água.

Atividade	Dessalinizador conectado no sistema isolado	Dessalinizador conectado no sistema híbrido
Montagem do arranjo fotovoltaico	Arranjo exclusivo e centralizado.	Arranjo compartilhado, centralizado ou distribuído.
Instalação elétrica	Montagem do quadro elétrico com controlador de carga e descarga.	Montagem do quadro elétrico convencional e extensão de um ramal da minirrede.
Instalação hidráulica	Convencional.	Convencional.
Obra civil	Montagem da estrutura de sustentação do arranjo fotovoltaico exclusivo.	Se a minirrede já existir, deve-se realizar a obra civil para a fixação dos postes e condutores elétricos até o quadro elétrico do dessalinizador.
Recursos humanos	Conhecimentos em instalações elétricas prediais e montagens de banco de baterias e quadro elétrico com controlador de carga e descarga.	Se a minirrede já existir, conhecimentos em instalações elétrica prediais. Se a minirrede não existir, conhecimentos em parametrização de inversores bidirecionais, instalações de baterias, geradores a diesel, inversores c.c./c.a. de conexão à rede, controladores de carga e rede de distribuição de energia elétrica.
Dimensionamento	Considera a acumulação eletroquímica no banco de baterias e o perfil de consumo de água preexistente.	Considera a acumulação eletroquímica no banco de baterias, o regime de funcionamento do gerador diesel e os perfis de consumo de eletricidade e de água preexistentes.
Bombeamento de água	Se não existir um sistema de bombeamento da água do ponto de captação ao dessalinizador, deve-se ter outro sistema fotovoltaico para realizar a captação da água a ser tratada ou verificar se a disponibilidade do sistema autônomo atende bombeamento e tratamento de água.	O sistema de bombeamento de água pode ser conectado à rede elétrica utilizando o mesmo ramal da minirrede usado para o dessalinizador. Nesse caso, pode-se montar um único quadro elétrico de distribuição com dois circuitos, um para bombeamento e outro para tratamento de água.
Dessalinização de água	Diurno ou noturno.	Diurno ou noturno.
Manutenção elétrica	Troca do controlador de carga e descarga e baterias.	Componentes do sistema híbrido e rede de distribuição de energia

		elétrica.
Manutenção hidráulica	Convencional.	Convencional.
Manutenção nas instalações	Limpeza do arranjo fotovoltaico dedicado.	Limpeza dos diferentes arranjos fotovoltaicos, poda de árvores no percurso da rede de distribuição e manutenção no gerador diesel.
Logística de suprimentos	Infraestrutura para adquirir e instalar controladores de carga, baterias e dessalinizador.	Infraestrutura para adquirir e instalar os diversos componentes do sistema híbrido e dessalinizador. Recursos para a aquisição e transporte de óleo diesel.
Custo operacional	Custos logísticos e de suprimentos para troca de baterias e reposição do controlador de carga.	Consumo de óleo diesel, troca dos filtros do gerador diesel e troca das baterias a cada ciclo de vida. Custos logísticos e de mão de obra para o suprimento de óleo diesel.

A tabela 21 mostra uma comparação entre as diferentes configurações para sistemas fotovoltaicos para produção de gelo, isolado usando conversor de frequência e conectado à minirrede.

Tabela 21: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos para produção de gelo.

Atividade	Máquina de gelo conectada no sistema isolado	Máquina de gelo conectada no sistema híbrido
Montagem do arranjo fotovoltaico	Arranjo exclusivo e centralizado.	Arranjo compartilhado, centralizado ou distribuído.
Instalação elétrica	Montagem do quadro elétrico com CF e parametrização do CF.	Montagem do quadro elétrico convencional e extensão de um ramal da minirrede.
Instalação hidráulica	Convencional.	Convencional.
Obra civil	Montagem da estrutura de sustentação do arranjo fotovoltaico exclusivo.	Se a minirrede já existir, deve-se realizar a obra civil para a fixação dos postes e condutores elétricos até o quadro elétrico da máquina que produz gelo.
Recursos humanos	Conhecimentos em instalações elétricas prediais, montagem de quadro elétrico com conversor frequência e parametrização de conversor de frequência.	Se a minirrede já existir, conhecimentos em instalações elétricas prediais. Se a minirrede não existir, conhecimentos em parametrização de inversores

		bidirecionais, instalações de baterias, geradores a diesel, inversores c.c./c.a. de conexão à rede, controladores de carga e rede de distribuição de energia elétrica.
Dimensionamento	Considera a acumulação de energia na forma de energia térmica para solidificação da água. Calor sensível e calor latente de solidificação da água.	Considera a acumulação eletroquímica no banco de baterias, o regime de funcionamento do gerador diesel e os perfis de consumo de eletricidade, de água e de gelo preexistentes.
Bombeamento de água	Se não existir um sistema de bombeamento da água do ponto de captação até a máquina de gelo, deve-se ter outro sistema fotovoltaico para realizar a captação da água.	O sistema de bombeamento de água pode ser conectado à rede elétrica utilizando o mesmo ramal da minirrede usado para a máquina de gelo.
Tratamento de água	Se já não existir um sistema de tratamento da água, caso necessário, deve-se ter outro sistema fotovoltaico para realizar o tratamento da água a ser congelada.	O sistema de tratamento de água pode ser conectado à rede elétrica utilizando o mesmo ramal da minirrede. Nesse caso, pode-se montar um único quadro elétrico de distribuição com três circuitos, um para bombeamento, outro para tratamento de água e o terceiro para a máquina de gelo.
Produção de gelo	Somente diurna, dependente da irradiância.	Diurna ou noturna.
Manutenção elétrica	Troca do conversor de frequência e parametrização.	Componentes do sistema híbrido e rede de distribuição de energia elétrica.
Manutenção de refrigeração	Quando utilizado com conversor de frequência, o compressor da máquina de gelo deve ser acionado por um motor de indução trifásico.	Convencional, o equipamento de refrigeração pode ser do tipo liga e desliga com controle por meio de termostato ou do tipo aberto, com compressor e motor separados.
Manutenção nas instalações	Limpeza do arranjo fotovoltaico dedicado.	Limpeza dos diferentes arranjos fotovoltaicos, poda de árvores no percurso da rede de distribuição e manutenção no gerador diesel.
Logística de suprimentos	Infraestrutura para adquirir e instalar conversores de frequência e equipamento de refrigeração com compressor	Infraestrutura para adquirir e instalar os diversos componentes do sistema híbrido. Recursos para a

	acionado por motor trifásico.	aquisição e transporte de óleo diesel.
Custo operacional	Sem custo, o sistema funciona de maneira autônoma, produzindo gelo enquanto houver energia solar suficiente.	Consumo de óleo diesel, troca dos filtros do gerador diesel e troca das baterias a cada ciclo de vida. Custos logísticos e de mão de obra para o suprimento de óleo diesel.

A tabela 22 mostra uma comparação entre as diferentes configurações para sistemas fotovoltaicos domiciliares, isolado e conectado à minirrede.

Tabela 22: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos domiciliares.

Atividade	Domicílio conectado no sistema isolado	Domicílio conectado no sistema híbrido
Montagem do arranjo fotovoltaico	Arranjo exclusivo e centralizado.	Arranjo compartilhado, centralizado ou distribuído.
Instalação elétrica	Montagem do quadro elétrico com controlador de carga e descarga e inversor c.c./c.a.	Montagem do padrão de entrada da concessionária local e extensão de um ramal da minirrede.
Obra civil	Montagem da estrutura de sustentação do arranjo fotovoltaico exclusivo. Construção do abrigo para as baterias.	Se a minirrede já existir, deve-se realizar a obra civil para a fixação dos postes e condutores elétricos até o padrão de entrada do domicílio.
Recursos humanos	Conhecimentos em instalações elétricas prediais e montagens de banco de baterias e quadro elétrico com controlador de carga e descarga e inversor c.c./c.a.	Se a minirrede já existir, conhecimentos em instalações elétricas prediais. Se a minirrede não existir, conhecimentos em parametrização de inversores bidirecionais, instalações de baterias, geradores a diesel, inversores c.c./c.a. de conexão à rede, controladores de carga e rede de distribuição de energia elétrica.
Dimensionamento	Considera a acumulação eletroquímica no banco de baterias e o perfil de consumo energético preexistente, como por exemplo, pilhas, velas, fósforo, GLP, lenha, querosene, óleo diesel, entre outros.	Considera a acumulação eletroquímica no banco de baterias, o regime de funcionamento do gerador diesel e os perfis de consumo energético e de água preexistentes.
Bombeamento de água	Condicionado à existência de	O sistema de bombeamento de

	motobomba monofásica ou em tensão contínua e à disponibilidade energética do SFD. Caso contrário, deve-se instalar um outro sistema fotovoltaico para conexão com a motobomba.	água pode ser conectado à rede elétrica através da extensão de um ramal da minirrede.
Dessalinização de água	Condicionado à existência de dessalinizador monofásico ou em tensão contínua e à disponibilidade energética do SFD. Caso contrário, deve-se instalar um outro sistema fotovoltaico para conexão com o dessalinizador.	O sistema de tratamento de água pode ser conectado à rede elétrica através da extensão de um ramal da minirrede.
Produção de gelo	Condicionado à existência de equipamento de congelamento monofásico ou em tensão contínua e à disponibilidade energética do SFD. Caso contrário, deve-se instalar um outro sistema fotovoltaico para conexão com o motor/compressor.	O sistema de produção de gelo pode ser conectado à rede elétrica através da extensão de um ramal da minirrede. Nesse caso, pode-se montar um único quadro elétrico de distribuição com três circuitos, um para o sistema de bombeamento e os outros para tratamento de água e para máquina de gelo.
Manutenção elétrica	Troca do controlador de carga e descarga, inversor c.c./c.a. e baterias.	Componentes do sistema híbrido e rede de distribuição de energia elétrica.
Manutenção nas instalações	Limpeza do arranjo fotovoltaico dedicado e verificação do nível de eletrólito das baterias.	Limpeza dos diferentes arranjos fotovoltaicos, poda de árvores no percurso da rede de distribuição, manutenção no gerador diesel, verificação do nível de eletrólito das baterias.
Logística de suprimentos	Infraestrutura para adquirir e instalar controladores de carga e descarga, inversores c.c./c.a. e baterias.	Infraestrutura para adquirir e instalar os diversos componentes do sistema híbrido. Recursos para a aquisição e transporte de óleo diesel.
Custo operacional	Custos logísticos e de suprimentos para troca de baterias e reposição do controlador de carga e descarga e inversor c.c./c.a.	Consumo de óleo diesel, troca dos filtros do gerador diesel e troca das baterias a cada ciclo de vida. Custos logísticos e de mão de obra para o suprimento de óleo diesel.

A tabela 23 mostra uma comparação entre as diferentes configurações para sistemas fotovoltaicos conectado à rede elétrica, sem baterias e com baterias.

Tabela 23: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.

Atividade	Domicílio conectado à rede elétrica sem bateria	Domicílio conectado à rede elétrica com bateria
Montagem do arranjo fotovoltaico	Arranjo exclusivo para acoplamento em c.a.	Arranjo para acoplamento c.a. e/ou c.c.
Instalação elétrica	Montagem do quadro elétrico. Instalação do inversor c.c./c.a. para conexão à rede elétrica.	Montagem do quadro elétrico. Instalação de controladores de carga, baterias e inversor c.c./c.a. para conexão à rede elétrica.
Obra civil	Montagem da estrutura de sustentação do arranjo fotovoltaico para o acoplamento c.a. Construção do quadro elétrico no padrão da concessionária local.	Montagem das estruturas de sustentação dos arranjos fotovoltaicos para os acoplamentos c.c. e c.a. Construção do quadro elétrico no padrão da concessionária local. Construção do abrigo para as baterias.
Recursos humanos	Conhecimentos em instalações elétricas prediais, montagem do quadro elétrico no padrão da concessionária e inversor c.c./c.a. de conexão à rede elétrica.	Conhecimentos em instalações elétricas prediais, montagem do quadro elétrico no padrão da concessionária, parametrização de inversores bidirecionais, instalação de baterias, inversores c.c./c.a. de conexão à rede e controladores de carga.
Dimensionamento	Considera a área disponível para instalação dos módulos fotovoltaicos, o consumo atual de eletricidade do domicílio e a quantidade de eletricidade gerada pela energia solar desejada pelo proprietário.	Considera a área disponível para instalação dos módulos fotovoltaicos, o consumo atual de eletricidade do domicílio, a quantidade de eletricidade gerada pela energia solar desejada pelo proprietário e o período de autonomia das baterias.
Queda de energia elétrica da concessionária local	O domicílio também é afetado, o sistema fotovoltaico para de funcionar e espera o reestabelecimento da rede elétrica da concessionária de energia.	O sistema fotovoltaico se desconecta da rede elétrica e o domicílio continua com eletricidade a partir do banco de baterias.
Manutenção elétrica	Troca do inversor c.c./c.a. de conexão à rede elétrica.	Troca do inversor c.c./c.a. de conexão à rede, inversor bidirecional, controlador de

		carga e baterias.
Manutenção nas instalações	Limpeza do arranjo fotovoltaico e poda de árvores nas suas proximidades.	Limpeza dos diferentes arranjos fotovoltaicos, poda de árvores e verificação do nível de eletrólito das baterias.
Logística de suprimentos	Infraestrutura para adquirir e instalar inversor c.c./c.a. de conexão à rede elétrica.	Infraestrutura para adquirir e instalar controladores de carga, inversores c.c./c.a. de conexão à rede, inversores bidirecionais e baterias.
Custo operacional	Custo de mão de obra para poda de árvores e de água para lavagem dos módulos.	Custo de mão de obra para poda de árvores e de água para lavagem dos módulos. Custos logísticos e de suprimentos para troca das baterias a cada ciclo de vida.

A tabela 24 mostra uma comparação entre os diferentes tipos de acoplamento para sistemas híbridos fotovoltaico-diesel de geração de energia.

Tabela 24: Comparação entre a instalação e gestão de duas configurações de sistemas híbridos de geração de energia elétrica.

Atividade	Acoplamento c.a.	Acoplamento c.c.
Montagem do arranjo fotovoltaico	Arranjo pode ser centralizado ou distribuído ao longo da minirrede.	Arranjo centralizado e próximo do banco de baterias.
Instalação elétrica	Montagem dos inversores c.c./c.a. de conexão à rede com seus respectivos arranjos ao longo da minirrede.	Instalação de controladores de carga e seus respectivos arranjos próximos às baterias.
Obra civil	As montagens dos arranjos fotovoltaicos para o acoplamento c.a. podem ser realizadas nos próprios postes da minirrede, nos telhados dos domicílios por onde passa a minirrede ou em outras estruturas construtivas ao longo do trajeto da rede de distribuição de energia.	As montagens dos arranjos fotovoltaicos para os acoplamentos c.c. estão mais limitadas quanto às possibilidades de instalação, normalmente devem ser próximas ao abrigo das baterias, a fim de se evitar gastos excessivos com cabos elétricos.
Recursos humanos	Conhecimento da distribuição espacial das cargas ao longo da minirrede para decidir os melhores pontos para instalação do	Conhecimentos do valor da tensão de carregamento das baterias no controlador de carga e nos demais componentes que carregam as baterias, afim de

	acoplamento c.a.	evitar conflitos no processo de carga.
Dimensionamento	Considera a área disponível para instalação dos módulos fotovoltaicos, o consumo atual de eletricidade do domicílio e a quantidade de eletricidade gerada pela energia solar desejada pelo proprietário.	Considera a área disponível para instalação dos módulos fotovoltaicos, o consumo atual de eletricidade do domicílio, a quantidade de eletricidade gerada pela energia solar desejada pelo proprietário e o período de autonomia das baterias.
Problemas na minirrede de distribuição ou falha no inversor bidirecional	Os inversores c.c./c.a. de conexão à rede param de funcionar e as baterias não são carregadas.	Os controladores de carga continuam carregando as baterias.
Potência disponibilizada às cargas no período diurno	Potência dos inversores bidirecionais mais potência do acoplamento c.a.	Potência dos inversores bidirecionais.
Potência disponibilizada às cargas no período noturno	Potência dos inversores bidirecionais.	Potência dos inversores bidirecionais.
Queda de tensão na rede de distribuição no período diurno	Pode ser melhorada com a inserção de inversores c.c./c.a. ao longo da minirrede.	Queda de tensão na rede de distribuição independe da geração fotovoltaica.
Perfil noturno de consumo de eletricidade	Eficiência de carregamento das baterias na manhã seguinte é determinada pelas eficiências dos inversores c.c./c.a. de conexão à rede e inversores bidirecionais.	Eficiência de carregamento das baterias na manhã seguinte é determinada pela eficiência dos controladores de carga.
Perfil diurno de consumo de eletricidade	Evita perdas no inversor bidirecional e nas baterias. A energia é injetada diretamente na rede de distribuição do sistema híbrido, através dos inversores c.c./c.a. de conexão à rede.	Perdas nas baterias e no inversor bidirecional. Antes de chegar às cargas, a energia fotogerada passa pelo controlador de carga, baterias e inversores bidirecionais.
Falha do inversor bidirecional	O sistema para de alimentar as cargas e de carregar as baterias.	O sistema para de alimentar as cargas, mas continua carregando as baterias.
Manutenção elétrica	Troca do inversor c.c./c.a. de conexão à rede.	Troca do controlador de carga.
Manutenção nas instalações	Limpeza dos arranjos fotovoltaicos centrais e distribuídos ao longo da rede de distribuição. Poda de	Limpeza dos arranjos fotovoltaicos centrais. Poda de árvores para evitar tanto o sombreamento no arranjo

	árvores para evitar sombreamento e falhas na rede de distribuição.	fotovoltaico como as falhas na rede de distribuição do sistema híbrido.
Logística de suprimentos	Infraestrutura para adquirir e instalar inversores c.c./c.a.	Infraestrutura para adquirir e instalar controladores de carga.

A figura 139 mostra uma visão sistêmica das relações entre os agentes atuantes na instalação e gestão de sistemas fotovoltaicos.

Figura 139: Visão sistêmica das inter-relações existentes na instalação e gestão de sistemas fotovoltaicos.

A tabela 25 sintetiza os requisitos necessários para a instalação e gestão de sistemas fotovoltaicos.

Tabela 25: Requisitos necessários para a instalação e gestão de sistemas fotovoltaicos.

Normativos
Portarias INMETRO 243/2009 e 004/2011; normas ABNT/NBR 17025, 5410, 16149, 16150 e 62116; normas regulamentadoras do MTE NR-10 e NR-35; Resoluções ANEEL 449/2011, 482/2012 e 493/2012; Resolução CONAMA 401/2008, Leis 11.445/2007 e 10.438/2002 do Governo Federal; procedimentos de distribuição de energia elétrica da ANEEL (PRODIST); e norma de distribuição da concessionária local.
Organização institucional
Apresentação e nivelamento dos agentes envolvidos; definição da agenda de trabalhos e da infraestrutura de acesso para as pessoas e equipamentos ao local da instalação; verificação documental das autorizações requeridas para os trabalhos envolvendo captação e distribuição de água; conferência dos registros profissionais, materiais, equipamentos e procedimentos de segurança adotados pelos prestadores de serviço; e verificação da logística de suprimento para a instalação e gestão dos sistemas fotovoltaicos em questão.
Avaliação pré-eletrificação
Visita ao local de instalação para avaliação da topologia do terreno; estudo dos possíveis locais para instalação dos módulos fotovoltaicos, observando a vegetação e os possíveis pontos de sombreamento; e aplicação de questionários para levantamento dos hábitos de consumo energético preexistentes, tais como pilhas, velas, querosene, GLP, óleo diesel, lenha, entre outros. Também deve-se considerar a existência de instalações comunitárias como escolas, postos de saúde, centros comunitários, igrejas, captação e tratamento de água e produção de gelo.
Avaliação do recurso hídrico
Localização do ponto de captação de água e estudo de suas características e usos; definição do modo de captação da água; análise da necessidade de tratamento da água; e avaliação da infraestrutura necessária para a correta disposição da água, após a utilização pelos usuários.
Projetos básico e executivo
Descrição do problema a ser resolvido; apresentação dos dados de irradiância do local e dos consumos de água e eletricidade preexistentes; definição da configuração do sistema fotovoltaico; teste de capacidade do poço; memória de cálculo com o dimensionamento das instalações elétricas e hidráulicas; desenhos com as plantas elétrica, hidráulica e civil do sistema fotovoltaico; descrição das informações de catálogo dos equipamentos selecionados; plano para prevenção dos impactos ambientais ¹⁸ causados pela iniciativa; procedimentos de instalação e comissionamento; teste do protótipo; definição da quantidade de equipamentos sobressalentes no almoxarifado local; e procedimentos para descarte dos materiais utilizados na iniciativa.
Recursos humanos

¹⁸ O plano para prevenção de impactos ambientais deve conter, no mínimo, os procedimentos de segurança relacionados com o transporte do óleo diesel, no caso de sistemas híbridos, como o veículo/embarcação usado no seu transporte e os recipientes para acondicioná-lo. Da mesma forma, o deslocamento das baterias eletroquímicas deve estar documentado, haja vista a presença de ácido sulfúrico (H₂SO₄) em seu interior. O descarte das baterias após o uso deve estar de acordo com a resolução CONAMA 401/2008. Quando envolvendo captação e tratamento de água, deve-se prever alguma maneira para realizar a correta disposição da água, depois que ela é utilizada pelas pessoas, e do rejeito contendo sal, quando instalados sistemas fotovoltaicos para dessalinização.

Registro profissional do responsável pela obra e dos instaladores junto ao CREA. Bem como dos registros de treinamentos realizados nas normas regulamentadoras NR-10 e NR-35 do MTE.

Normalmente conta-se com uma equipe diversificada de profissionais, isso devido à natureza dos trabalhos, envolvendo conhecimentos nas áreas de elétrica, hidráulica e civil. Normalmente, também participam dessa equipe profissionais ligados às ciências humanas, tais como sociólogos e antropólogos. Sempre que possível, é bom incluir algum agente de saúde, alguém que conheça as áreas de maior incidência de certas doenças na região, que saiba executar procedimentos de primeiros socorros e que saiba lidar com situações de emergência. Portanto, essa inclusão torna a equipe, ainda, mais multidisciplinar e contribui para que a execução dos trabalhos seja feita com maior segurança.

Recursos humanos capacitados e habilitados para uso dos materiais e ferramentas necessários à execução da instalação e do comissionamento do sistema fotovoltaico.

O responsável local pela gestão do sistema fotovoltaico deve ser capaz de realizar as atividades para viabilizar a logística de suprimento, definida na fase de planejamento da iniciativa. Ele também cuida do almoxarifado local com as peças de reposição e, se não ele, sabe quem realiza e providencia os meios para concretizar as manutenções que, eventualmente, o sistema precise.

Esse responsável, no caso de sistemas híbridos, deve ser capaz de: verificar a operacionalidade do sistema; abastecer o gerador a diesel com combustível; efetuar plano de contingência em caso de parada dos equipamentos; e inibir maus usos do sistema, de forma a preservar o bem comum.

Seguem algumas fotos do acervo de fotografias do LSF, constituído por imagens que foram registradas durante as iniciativas de eletrificação em que estiveram presentes pesquisadores desse laboratório. As imagens apresentadas fazem alusão às etapas essenciais de projetos de eletrificação em comunidades tradicionais, localizadas distantes das redes elétricas convencionais e que utilizam meios próprios para obtenção de iluminação, água potável e gelo, para citar alguns serviços demandados.

As situações exibidas nessa memória fotográfica, embora específicas para cada tipo de sistema fotovoltaico, fazem referência às fases do processo de planejamento e gestão dessas iniciativas de eletrificação. São úteis para implantação de qualquer tipo de sistema fotovoltaico, seja ele para bombeamento e tratamento de água, para produção de gelo, para eletrificação individual ou para minirrede.

Inicia-se a apresentação por uma que mostra algumas das principais embarcações utilizadas para transporte fluvial, o único meio disponível para o deslocamento de milhares de pessoas que vivem na Amazônia Legal, por exemplo. Na figura 140 aparece uma embarcação de médio porte, uma lancha com motor de 40 HP, conhecida popularmente como voadeira, e duas embarcações tradicionais, atracadas à margem do rio. Essas embarcações tradicionais, chamadas rabetas,

podem ser movidas a remo ou com motores de pequeno porte, menores que 10 HP, movidos à gasolina.

Figura 140: Planejamento de projetos – embarcações para logística de transporte.

É na fase de planejamento que se deve definir a logística de transporte, das pessoas e dos materiais, requerida para efetivar a iniciativa de eletrificação. A escolha pelo tipo de embarcação a ser utilizada implica custos muito distintos. O autor desta tese, em sua dissertação de mestrado, realizou medições de tempo e combustível para os mesmos trechos percorridos pelos três tipos de embarcação mostrados na foto anterior. Os resultados revelam que os custos de deslocamento, no caso estudado, são 1.060 reais, 585 reais e 65 reais, para o barco de médio porte, voadeira e rabeta, respectivamente. Já o tempo para percorrer os mesmos trechos, somando-se a ida e a volta, é de: 14 horas, 5 horas e 16 horas, para o barco de médio porte, voadeira e rabeta, respectivamente.

Uma vez definida a logística de transporte, parte-se rumo à comunidade a ser eletrificada com sistemas fotovoltaicos. A prática recomenda que sejam contatadas inicialmente as lideranças locais, como líderes religiosos, presidentes de associações coletivas, responsáveis pelos sistemas elétricos preexistentes, agentes de saúde, pessoas mais antigas na comunidade; enfim, pessoas que tenham alguma representatividade, para iniciar as interações entre a equipe de implantação e a comunidade.

Por intermédio dessas lideranças, sugere-se uma reunião de nivelamento com todos os moradores interessados e a equipe de implementação para explicar os benefícios e as limitações do projeto, com os principais questionamentos e explicações registrados em ata, para imprimir um caráter oficial na missão e para usá-la em argumentações futuras com a comunidade. A figura 141 mostra um desses momentos coletivos, uma reunião no centro comunitário com todos os moradores e a equipe, em uma conversa de nivelamento. Na pauta: energia solar, perspectivas, direitos e deveres.

Figura 141: Planejamento de projetos – reunião para apresentação da proposta.

Quando se pretende transferir uma tecnologia para os moradores de uma comunidade, há que se verificar quais são as relações entre a população e os recursos energéticos preexistentes. Isso, à primeira vista, pode configurar como interferência excessiva, pois exige a entrada na casa das pessoas para questionamentos a respeito de suas rotinas, seus hábitos. Mas, quando bem conduzido, preocupando-se em pedir permissões para acessar o domicílio e para realizar a entrevista, aporta informações úteis ao processo de eletrificação.

Conhecer os hábitos de consumo dos energéticos usados para iluminação, por exemplo, ajuda a estimar qual a demanda energética ideal para atender determinado domicílio. A primeira foto da figura 142 mostra um pesquisador e um

morador conversando sobre hábitos de consumo, a outra mostra o morador com suas lamparinas artesanais com querosene, usadas para iluminação do domicílio mais de um século após a invenção da lâmpada elétrica.

Figura 142: Planejamento de projetos – verificação da situação pré-eletrificação.

Um dos resultados quantificáveis dessa pesquisa sobre hábitos de consumo é o conhecimento dos gastos com energéticos preexistentes. As quantias gastas servem para prever quanto seria um valor razoável, necessário para viabilizar um fundo de operação e manutenção do sistema fotovoltaico a ser instalado. A figura 143 mostra um exemplo do gasto com energéticos de um domicílio. Nesse caso, as pessoas não usam querosene e sim velas e pilhas para iluminação.

Figura 143: Planejamento de projetos – gastos com energéticos preexistentes.

Além dos gastos para aquisição dos referidos recursos energéticos, o planejamento deve considerar outros custos, como os envolvidos na compra de gelo, para citar outra despesa. A tabela 26 mostra os resultados de uma pesquisa que exemplifica os esforços envolvidos para compra de gelo em uma comunidade, relativamente próxima de um centro urbano, porém sem eletricidade que permita o funcionamento contínuo de frízeres, necessários para fabricação de gelo.

Tabela 26: Planejamento de projetos – esforços envolvidos para aquisição de gelo.

Item	Descrição
Embarcação	Voadeira com motor de 15 HP.
Combustível	12 litros de gasolina para ir e voltar da comunidade até o município mais próximo.
Tempo	Varia de 3 a 4 horas, dependendo da época do ano, para ir e voltar.
Peixe	Pesca de 40 a 60 kg por semana.
Gelo	Necessita de 11 barras de gelo a cada 5 dias. Cada barra de gelo custa R\$ 2 (dois reais).
Modo de acondicionamento do gelo	Caixas de isopor com capacidade de 60 litros.
Duração do gelo dentro da caixa de isopor	Depende da dinâmica de abertura e fechamento da caixa de isopor. Com poucas aberturas, o morador informou que a condição fria permanece por até 5 dias.
Outros custos e riscos	Depreciação da embarcação, óleo lubrificante para o motor da embarcação, contratempos, riscos de acidentes, etc.

Uma etapa fundamental no planejamento da iniciativa de eletrificação fotovoltaica refere-se ao dimensionamento. Com a intenção de facilitar esta tarefa, a ANEEL, por meio da resolução 493/2012, definiu algumas classes de atendimento, que representam consumos padronizados por Unidade Consumidora (UC), válidos em todo território nacional, como detalha a tabela 27. É com base nessa tabela que todo SIGFI ou MIGDI deve ser dimensionado, caso queira-se contabilizá-lo nas metas de universalização de energia elétrica, fiscalizadas pela ANEEL.

Tabela 27: Valores de referência estabelecidos pela resolução ANEEL 493/2012 para SIGFI e MIGDI.

Disponibilidade mensal garantida (kWh/mês/UC)	Consumo de Referência (Wh/dia/UC)	Autonomia mínima (horas)	Potência mínima (W/UC)	Continuidade do serviço de energia elétrica (horas)
13	435	48	250	DIC mensal = 216 horas DIC anual = 648 horas
20	670		250	
30	1.000		500	
45	1.500		700	
60	2.000		1.000	
80	2.650		1.250	

Com as informações coletadas sobre os hábitos de consumo energético, pode-se, então, determinar qual classe de operação atende às expectativas do domicílio pesquisado. Uma vez definida essa classe e a sua configuração, SIGFI ou MIGDI, deve-se dimensionar o sistema de modo que ele satisfaça os requisitos estabelecidos pela ANEEL, atentando à autonomia mínima de dois dias do banco de baterias, à potência elétrica que o morador terá a seu dispor e à continuidade do serviço ofertado.

De posse da configuração e das características do sistema fotovoltaico a ser implementado, é hora de instalá-lo. Nesse momento, no qual o sistema idealizado deve sair do papel para se tornar realidade, deve-se direcionar atenção à documentação do sistema energético. Nesse sentido, a elaboração de todos os diagramas elétricos da instalação, além de ser uma exigência da norma NBR 5410, ajuda os instaladores a executarem o que foi planejado.

Com a intenção de exemplificar o que foi dito, as três figuras¹⁹ a seguir apresentam diagramas que compõem o prontuário elétrico de um sistema híbrido. Na primeira delas, de número 144, constam os circuitos que operam em c.c. e em c.a., os quadros elétricos e o gerador a diesel.

¹⁹ As figuras 144, 145 e 146 fazem parte do projeto básico desenvolvido pela equipe do Grupo de Energia da Escola Politécnica (GEPEA-USP) em parceria com o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do IEE-USP, no âmbito do projeto P&D ANEEL PD-2331-0021-2011, coordenado pela professora Eliane Fadigas do GEPEA-USP. Nesse projeto estão previstas a eletrificação de quatro comunidades localizadas no Estado do Amapá por meio de sistemas híbridos.

Figura 144: Planejamento de projetos – diagrama elétrico geral.

A figura 145 mostra uma representação da vista superior da rede de distribuição do sistema híbrido apresentado na figura 144. Observa-se que a minirrede foi dividida em circuitos, como acontece em um sistema elétrico convencional.

Figura 145: Planejamento de projetos – diagrama elétrico da rede de distribuição.

A figura 146 torna visível alguns detalhes da área de geração fotovoltaica dessa minirrede, com as especificações das valas que devem ser escavadas para colocação dos eletrodutos de energia e de sinal e a indicação do ponto cardeal Norte, fundamental para posicionamento dos módulos fotovoltaicos.

Figura 146: Planejamento de projetos – diagrama elétrico da área de geração.

A etapa de planejamento também deve prever a coleta e controle das informações sobre o consumo mensal de eletricidade de cada domicílio. Conhecer esses perfis de consumo auxilia nas tomadas de decisão sobre a operação e gestão do sistema fotovoltaico em questão.

Com todos os requerimentos da fase de planejamento resolvidos, parte-se para a instalação propriamente dita.

3.4.2 Instalação e manutenção de sistemas

Os altos custos de geração, aliados à falta de normas e procedimentos padronizados de instalação, deixavam os energéticos não convencionais em posição desprivilegiada em relação aos já consolidados. Com esse contexto se

modificando, caso ocorra o aparecimento de um novo paradigma de geração elétrica determinado pela progressiva utilização dessas novas tecnologias, é natural o surgimento de resistências por parte das empresas concessionárias, acostumadas a operar segundo regras estabelecidas no paradigma anterior.

A utilização das novas tecnologias demandará novos procedimentos e diferentes formas de se planejar o setor. Essa resistência inicial foi identificada em outros países como uma grande barreira à entrada dessas novas tecnologias. Não obstante, essa barreira poderá ser suplantada ou pelo menos amenizada caso sejam estabelecidos procedimentos claros para a conexão dos sistemas, normas técnicas que garantam a segurança e a qualidade da energia e, principalmente, orientações claras para que o setor inclua essas opções em seu planejamento.

A partir desse momento, são apresentados os procedimentos iniciais necessários para aquisição, instalação e operação de sistemas fotovoltaicos. Neles, constam as normas de segurança e as normas que averiguam a qualidade da energia gerada. O seu cumprimento é condição essencial para a oficialização desses sistemas energéticos perante a ANEEL.

No que se refere à instalação, é importante que todas as normas e recomendações existentes para sistemas que operam em baixa tensão sejam cumpridas. As instalações elétricas para aplicações fotovoltaicas são regidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio de normas específicas e da NBR 5410, que trata das instalações elétricas de baixa tensão. Essa norma estabelece as condições a serem satisfeitas pelas instalações elétricas alimentadas sob uma tensão nominal igual ou inferior a 1.000 V em c.a. ou inferior a 1.500 V em c.c., a fim de garantir a segurança de pessoas e animais, o funcionamento adequado da instalação e a conservação dos bens.

A aplicação da NBR 5410 nas instalações residenciais é considerada a partir do ponto definido como origem da instalação. Nas instalações alimentadas por fontes próprias de energia em baixa tensão, como é o caso dos SFDs, a origem é considerada de forma a incluir a fonte, portanto toda a instalação do SFD está contida na NBR 5410.

Os componentes e materiais da instalação devem satisfazer as normas brasileiras que lhes sejam aplicáveis e, na falta dessas, as normas IEC e ISO. Além

disso, esses componentes e materiais devem ser adequados às condições de serviço da instalação, observando os valores de tensão, corrente, frequência e potência a que serão submetidos e também verificando a compatibilidade eletromagnética com o ambiente a sua volta.

Com relação às exigências da norma NBR 5410 relativas à documentação do projeto de instalação elétrica, esta deve conter plantas, esquemas, detalhes da montagem, memorial descritivo e especificação dos componentes. Nas plantas devem constar a localização dos quadros de distribuição, os percursos e características das linhas elétricas e a localização dos pontos de luz e das tomadas de corrente.

A instalação e a manutenção de sistemas fotovoltaicos também devem se pautar nos requisitos estabelecidos pelas Normas Regulamentadoras NR-10 e NR-35, de responsabilidade do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), que trata da segurança em instalações e serviços em eletricidade e dos trabalhos realizados em altura superior a 2 metros do nível do solo, respectivamente.

É importante destacar que todos os requerimentos apresentados nesta seção são essenciais para garantir a qualidade e a durabilidade das instalações fotovoltaicas, assim como a segurança das pessoas. O compromisso com a conformidade técnica das instalações e com a integridade das pessoas deve ser respeitado, garantindo a execução dos trabalhos com a seriedade e o profissionalismo que esta atividade requer.

A seguir, apresentam-se algumas fotos que ilustram situações do cotidiano profissional de instaladores e responsáveis pela manutenção de sistemas fotovoltaicos. Elas também fazem parte do acervo fotográfico da Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP.

A figura 147 mostra a localização de uma região onde foram implementados projetos variados de eletrificação por energia solar, alguns para bombeamento de água, outros para prover radiofonia a comunidades longínquas, permitindo que elas se comuniquem à distância. Esses projetos também contaram com a participação de pesquisadores do LSF.

Figura 147: Instalação de sistemas – mapa do Alto Solimões.

Na figura 148 aparecem pessoas conferindo materiais e discutindo questões concernentes ao início dos trabalhos de instalação de um sistema de bombeamento de água. É importante atentar a que tipo de embarcação usar para transportar as tubulações e caixas de água, módulos fotovoltaicos e demais componentes do sistema a ser instalado.

Figura 148: Instalação de sistemas – conferência dos materiais.

A figura 149 mostra um quadro elétrico para bombeamento de água sendo instalado para compor o sistema fotovoltaico. A composição em forma de palafita e poste foi escolhida por se tratar de uma região de várzea, onde existe um ciclo anual de cheias e vazantes nos rios e igarapés, bem típico em toda Região Amazônica.

Figura 149: Instalação de bombeamento – vala, canos, quadro elétrico e módulos fotovoltaicos.

Na figura 150 pode ser visualizado um sistema fotovoltaico instalado em área inundável, em uma comunidade situada na região mostrada no mapa precedente.

Figura 150: Instalação de bombeamento – vista de um sistema no Alto Rio Solimões.

Os trabalhos finais de instalação de um sistema fotovoltaico para bombeamento de água estão sendo mostrados na figura 151. Nota-se o conjunto completo: módulos fotovoltaicos fixados no poste, caixas de água sobre a estrutura de sustentação, tubulação de água enterrada e motobomba no poço.

Figura 151: Instalação de bombeamento – boca do poço, módulos fotovoltaicos e caixas de água.

A figura 152 mostra dois recipientes, o da esquerda contém água obtida pelo sistema fotovoltaico de bombeamento e tratamento por filtração recém instalado, o outro ilustra a qualidade da água consumida pelos moradores diretamente do igarapé, antes de existir o sistema energético solar. A diferença na coloração das águas exemplifica um benefício aportado pelo uso da energia solar na comunidade em questão.

Figura 152: Instalação de bombeamento – água limpa obtida com sistema fotovoltaico e suja utilizada antes da instalação do sistema.

Na mesma região, Alto Rio Solimões, foram instalados sistemas de telecomunicação para comunidades distantes do entorno urbano. A figura 153 mostra comunitários ajudando a segurar uma escada, para que a instalação do gerador fotovoltaico fosse concluída.

Figura 153: Instalação de sistema fotovoltaico para radiofonia – poste com módulos fotovoltaicos.

A montagem das antenas para telecomunicação nos postes e os esforços para levá-los aparecem nas fotos da figura 154.

Figura 154: Instalação de radiofonia – instalação de antenas e fixação de postes.

As fotos da figura 155 mostram algumas antenas instaladas nessa iniciativa, ao lado esquerdo, e um comunitário se comunicando com um vizinho localizado a quilômetros de distância, na foto da direita, por meio do sistema de radiofonia recém instalado no centro comunitário desta localidade.

Figura 155: Instalação de radiofonia – antenas e aparelho de rádio.

As próximas fotografias mostram outra iniciativa de implantação de sistemas fotovoltaicos, desta vez de sistemas individuais, instalados em cada um dos cinco domicílios da comunidade de Varadouro, localizada na Ilha do Cardoso, litoral Sul do Estado de São Paulo, cujo mapa de acesso é mostrado na figura 156.

Figura 156: Instalação de sistemas – mapa da Ilha do Cardoso.

Recomenda-se, na ocasião das primeiras visitas ao local, o georeferenciamento do trajeto e da localidade a ser atendida. As fotos da figura 157 mostram, na esquerda, um painel com instrumentos de navegação de uma embarcação e, na direita, pesquisadores atracando uma voadeira à margem de um canal marítimo, perto da trilha que dá acesso à comunidade. Nota-se, na foto da direita, ao fundo, a paisagem do lugar, com as montanhas e a vegetação típica da mata atlântica.

Figura 157: Instalação de sistemas – transporte marítimo.

O deslocamento terrestre nesse cenário exige uma caminhada de 6 quilômetros pela trilha, composta por pontes estreitas e trechos esburacados, para transportar os materiais necessários à instalação dos sistemas. Nas fotos da figura 158 aparecem comunitários e pesquisadores transportando, pelas trilhas de acesso à comunidade, os materiais para a instalação dos sistemas fotovoltaicos individuais.

Figura 158: Instalação de sistemas – comunitários e equipe transportando materiais.

Nesse projeto, optou-se por instalar o gerador fotovoltaico em um poste de madeira. Para que isso se concretize, é preciso montar uma estrutura de sustentação para os módulos fotovoltaicos e depois posicioná-los no poste. As fotos

da figura 159 mostram os trabalhos de montagem dessa estrutura de sustentação, composta por uma barra e duas longarinas de Alumínio.

Figura 159: Instalação de sistemas – preparação da estrutura de fixação dos módulos fotovoltaicos.

Os trabalhos para realizar as conexões elétricas (que associam os módulos para formar um arranjo fotovoltaico) e para fixar o gerador fotovoltaico no poste aparecem nas fotos da figura 160, esquerda e direita, respectivamente.

Figura 160: Instalação de sistemas – conexão elétrica entre os módulos fotovoltaicos e preparação do poste para sustentação do arranjo fotovoltaico.

O ajuste da direção e da inclinação do gerador fotovoltaico é mostrado nas fotos da figura 161. Na foto da direita, aparece o inclinômetro, para verificar o ângulo de inclinação do arranjo fotovoltaico. Embora muito útil, essa ferramenta

pode ser substituída pelo desenho de triângulos, obtendo-se de forma simples, por meio de fórmulas de geometria plana, as distâncias envolvidas para o posicionamento desta superfície plana em um poste.

Figura 161: Instalação de sistemas – posicionamento e inclinação do arranjo fotovoltaico.

A figura 162 mostra as baterias eletroquímicas, do tipo gel, sendo preparadas para instalação. Nota-se algumas ferramentas para a execução dessa atividade.

Figura 162: Instalação de sistemas – baterias.

O quadro elétrico do sistema fotovoltaico domiciliar, contendo os disjuntores, controlador de carga e descarga, inversor c.c./c.a para aplicação isolada, medidor de Ah e interruptor DR é apresentado na figura 163.

Figura 163: Instalação de sistemas – quadro elétrico no interior de um domicílio.

A figura 164 apresenta um domicílio da tradicional comunidade do Varadouro, com seu sistema solar próprio de geração de eletricidade.

Figura 164: Instalação de sistemas – residência eletrificada com energia solar.

Lâmpada, ventilador, rádio, televisor e receptor para antena parabólica, como os mostrados na figura 165, são alguns dos eletrodomésticos adquiridos pelas famílias após a instalação dos sistemas fotovoltaicos que permitiram acesso à eletricidade.

Figura 165: Instalação de sistemas – equipamentos de uso final de energia.

O trabalho conjunto entre os pesquisadores do LSF e a comunidade do Varadouro começou em 1998. Desde então, foram sendo implementados projetos variados com o uso da energia solar, sobretudo para uso comunitário. As fotos da figura 166 mostram, da esquerda para direita e de cima para baixo, a escola com um sistema de bombeamento de água e radiofonia, uma vista em detalhes da antena de radiofonia instalada em uma torre do lado da escola, a lavanderia e a igreja.

Figura 166: Instalação de sistemas - sistemas fotovoltaicos para uso comunitário na comunidade de Varadouro.

A foto da esquerda na figura 167 mostra uma vista onde aparecem as caixas de água, os tanques e o abrigo para bomba de superfície da lavanderia. A da direita ilustra que tipo de melhoramento um sistema fotovoltaico é capaz de proporcionar na vida de uma pessoa. Nesse exemplo, uma senhora, que antes precisava se deslocar na companhia dos filhos pequenos até a beira de um riacho para lavar as roupas e louças da família, agora pode desempenhar as mesmas atividades em um

lugar coberto. Futuramente, essa senhora pode se beneficiar de uma lavanderia mais moderna, com máquinas de lavar movidas à eletricidade; por enquanto, essa simples, porém funcional lavanderia, foi o que a equipe do LSF pôde concretizar.

Figura 167: Instalação de sistemas – detalhes da lavanderia fotovoltaica de Varadouro.

Essa seção, como já explicado, procura apresentar conhecimentos necessários para que instaladores de sistemas fotovoltaicos possam atuar de maneira satisfatória no exercício de sua profissão. Para tanto, optou-se utilizar fotos como recurso visual, tornando visíveis algumas situações que ocorrem quando se instalam diferentes tipos desses sistemas. Nesse sentido, são mostradas algumas fotos registradas em Ilha Solteira, onde foram montados dois seguidores solares do LSF-IEE-USP. A figura 168 mostra um caminhão com guindaste içando um poste de sustentação de um dos seguidores solares.

Figura 168: Instalação de sistemas – seguidor solar.

Na figura 169 aparecem dois técnicos alinhando um poste: um dos técnicos utiliza um nível para verificar o alinhamento e o outro ajusta as porcas dos parafusos.

Figura 169: Instalação de seguidor solar – posicionamento do poste de sustentação do arranjo fotovoltaico.

A figura 170 mostra os arranjos fotovoltaicos prontos para serem içados pelo guindaste e fixados no poste já instalado.

Figura 170: Instalação de seguidor solar – arranjos de módulos fotovoltaicos e de módulos de concentração.

A figura 171 mostra um dos arranjos fotovoltaicos que usam lente para concentração da radiação solar sendo instalado na sua estrutura de suporte. Ao lado do caminhão podem ser vistas as outras partes que compõem esse seguidor do Sol.

Figura 171: Instalação de seguidor solar – posicionamento de um arranjo de módulos fotovoltaicos de concentração.

Na figura 172 aparecem profissionais realizando uma soldagem na estrutura de sustentação do seguidor solar com concentração. Ressalta-se que, em empreendimento como esse, a equipe de implementação deve possuir uma lista de empresas que estejam localizadas próximas à instalação, capazes de operar caminhões, guindastes, máquinas para serralheria, entre outros, com a finalidade de evitar a paralisação dos trabalhos em campo.

Figura 172: Instalação de seguidor solar – soldagem de partes da estrutura de sustentação.

A figura 173 mostra os dois seguidores solares montados. O seguidor da esquerda é formado por módulos fotovoltaicos monocristalinos e o da direita é composto por módulos fotovoltaicos com concentração.

Figura 173: Instalação de seguidor solar – vista dos sistemas completos.

As imagens seguintes são da Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF, no *campus* da USP, que ilustram fases importantes da instalação do campo de provas para ensaios de operacionalidade em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. A figura 174 mostra os preparativos para instalação da central fotovoltaica de 150 kWp montada sobre o terreno. Nota-se a presença de um trator com pá carregadeira para auxiliar no transporte das caixas que pesam 400 kg, nas quais estão acondicionados os módulos fotovoltaicos.

Figura 174: Instalação de central fotovoltaica – transporte dos materiais.

Na figura 175 aparecem as bases de concreto nas quais são aparafusadas as estruturas para fixação dos módulos fotovoltaicos.

Figura 175: Instalação de central fotovoltaica – bases de concreto e estruturas de fixação.

A figura 176 mostra a montagem dos geradores fotovoltaicos, formados pela associação de módulos fotovoltaicos devidamente interconectados.

Figura 176: Instalação de central fotovoltaica – montagem dos módulos fotovoltaicos.

A figura 177 mostra a montagem do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica localizado sobre o prédio de administração do IEE-USP. Observa-se que as estruturas para sustentação dos módulos fotovoltaicos foram postas acima das telhas, sem a necessidade de remoção do telhado. As bases nas quais se apóiam as estruturas foram concretadas na laje existente embaixo das telhas. É importante mencionar que o trabalho de montagem de um sistema como esse é feito passo a passo, módulo por módulo, parafuso por parafuso, conexão por conexão, por isso a importância de tudo estar planejado e documentado.

Figura 177: Instalação de sistemas sobre telhado – montagem das estruturas.

Para tornar visível outra forma de integrar módulos fotovoltaicos ao ambiente construído, aproveitando áreas já existentes para gerar eletricidade sem ocupar um espaço exclusivo, como é o caso de um estacionamento para veículos existente no IEE, mostra-se a figura 178. Destaca-se a presença de um andaime que auxilia nas atividades de fixação do arranjo fotovoltaico na estrutura de Alumínio. Em muitas circunstâncias, em razão das dimensões dos módulos fotovoltaicos, exige-se a presença de duas pessoas em uma altura superior a dois metros; nessa situação, o trabalho com escadas torna-se mais perigoso e menos eficiente. Para que a montagem seja realizada em concordância com as exigências do Ministério do Trabalho e Emprego, deve-se estar atento aos procedimentos de segurança prescritos na norma NR-35, por isso é importante prever, ainda na fase de planejamento da iniciativa, a necessidade de andaimes durante as montagens do sistema fotovoltaico.

Figura 178: Instalação de sistema fotovoltaico para sombreamento de veículos.

As instalações elétricas dos sistemas fotovoltaicos devem ser submetidas a uma verificação final antes de entregues ao uso. Essa verificação final consiste em um conjunto de procedimentos realizados durante ou após a conclusão dos trabalhos, com o objetivo de verificar sua conformidade com as prescrições da NBR 5410. Esses ensaios são realizados depois de uma inspeção visual na instalação e

devem verificar a continuidade dos condutores de proteção, a resistência de isolamento da instalação e o funcionamento das medidas de proteção.

A esse conjunto de testes que verificam se a instalação está segura e dentro das normas dá-se o nome de comissionamento. Fazendo referência a algumas das principais situações encontradas, quando da realização desses testes que verificam se uma instalação elétrica pode ou não ser liberada para o uso de pessoas, são mostradas as quatro fotografias a seguir.

Na primeira foto, mostrada na figura 179, aparece um dos quadros elétricos de distribuição da minirrede do LSF. Essa figura faz alusão à documentação da instalação, essencial para a realização do comissionamento. Nessa documentação devem constar: a memória de cálculo²⁰ e as plantas elétricas dos circuitos; a ligação do disjuntor geral, do interruptor DR e dos circuitos secundários; o esquema de ligação dos DPS; a espessura da barra de cobre do barramento de distribuição; a localização das barras de equipotencialização e da haste de aterramento; a bitola e a tensão de isolamento dos cabos elétricos; o código de cores²¹ desses cabos; ocupação dos eletrodutos²²; e os pontos de entrega de energia oriundos desse quadro²³.

²⁰ A memória de cálculo da instalação deve apresentar a potência de cada circuito com a indicação da corrente de cada disjuntor, além da metodologia usada para dimensionamento dos cabos elétricos, a qual considera o fator de agrupamento, constantes térmicas e tipo da instalação.

²¹ A norma NBR 5410 reserva a cor azul para o condutor neutro. Para o condutor terra deve-se usar a cor verde ou verde-amarelo.

²² Um eletroduto não pode ser preenchido completamente por cabos, a ocupação máxima que se deve respeitar é o equivalente a $\frac{3}{4}$ de sua seção transversal, para permitir a troca de calor entre os cabos elétricos em seu interior e o ambiente externo.

²³ No caso de um quadro elétrico de distribuição, os pontos de entrega de energia são as tomadas e os pontos de iluminação.

Figura 179: Comissionamento de sistemas fotovoltaicos - quadro elétrico de distribuição.

O comissionamento também determina que sejam realizadas medições elétricas na instalação, além da verificação documental que comprova sua adequação ao projeto. Essas medições averigüam se os níveis de tensão, corrente, frequência, resistência de aterramento e continuidade dos condutores de proteção da instalação estão coerentes com o idealizado. A figura 180 mostra algumas dessas medições sendo realizadas no SIGFI13 do LSF. Mede-se antes e depois dos disjuntores, diretamente nos terminais dos equipamentos de condicionamento de potência, nas caixas de junção dos módulos fotovoltaicos, enfim, avaliam-se as variáveis elétricas mais relevantes nos principais pontos da instalação. Os valores encontrados devem ser documentados e anexados ao seu prontuário elétrico.

Figura 180: Comissionamento de sistemas fotovoltaicos – medições em sistemas domiciliares.

A figura 181 apresenta fotografias que ilustram atividades de comissionamento sendo realizados em outros sistemas fotovoltaicos. A primeira delas, no canto superior esquerdo, mostra uma medição de corrente²⁴ em um dos quadros de acoplamento c.c. da minirrede do LSF. Ao seu lado, aparece uma verificação da tensão de saída no quadro elétrico com conversor de frequência da máquina de gelo do LSF. As outras fotos exibem situações nas quais são verificadas a tensão no quadro de entrada e no de acoplamento c.a. da minirrede do LSF.

Nos testes de comissionamento também é útil o uso de uma câmera termográfica²⁵ para verificação de pontos quentes no sistema fotovoltaico. Por

²⁴ A medição da corrente elétrica é bastante facilitada quando se usa um alicate amperímetro, o que evita a necessidade da abertura do circuito para inclusão de um amperímetro em série com ele. Às vezes, porém, incluir um amperímetro em série com o circuito é impraticável.

²⁵ Uma câmera termográfica é um equipamento que consegue captar a radiação infravermelha que é emitida por qualquer tipo de objeto, o que permite determinar sua

isso, é importante visualizar termicamente todos os componentes de um sistema fotovoltaico, sem exceção: módulos fotovoltaicos, controladores, inversores, baterias, gerador a diesel, disjuntores, DPS, medidores, cabos, entre outros.

Figura 181: Comissionamento de sistemas fotovoltaicos – medições em conversores de frequência e em sistemas híbridos.

A figura 182 mostra a medição simultânea de corrente e tensão no banco de baterias do sistema híbrido do LSF. O comissionamento do banco de baterias também verifica: a ventilação do abrigo das baterias²⁶; a quantidade e a densidade do eletrólito²⁷ e a tensão em cada bateria; a corrente e a tensão do banco de baterias; a temperatura externa de uma bateria e a temperatura ambiente do abrigo; e a proteção com vaselina dos terminais da bateria.

temperatura sem nenhum método intrusivo, apenas direcionando a câmera para o equipamento sob teste. Essa verificação da condição térmica dos equipamentos permite avaliar se as medidas tomadas para prevenção de superaquecimento estão funcionando adequadamente, como as aberturas para ventilação e os dissipadores para troca de calor.

²⁶ O processo de carga de uma bateria eletroquímica produz gás Hidrogênio, que acima de certas concentrações torna-se explosivo. Para evitar incêndios é fundamental que o abrigo para as baterias seja ventilado. O manual da bateria deve informar qual é o volume de Hidrogênio gerado quando ela é carregada por uma determinada corrente elétrica.

²⁷ O fabricante da bateria, normalmente, disponibiliza meios visuais para verificação do nível máximo e mínimo do eletrólito no interior de uma bateria. Já a densidade do eletrólito deve ser medida com um aparelho chamado densímetro.

Figura 182: Comissionamento de sistemas fotovoltaicos – medições em banco de baterias.

O título desta seção sugere que, além de expor argumentos que reafirmem a importância da execução dos trabalhos de instalação observando as normatizações técnicas e legais vigentes, deve-se também apresentar elementos que elucidem situações relacionadas à manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

A NBR 5410 estabelece que a manutenção das instalações deve ser feita com periodicidade adequada a cada tipo de instalação, levando em consideração a complexidade do sistema, a importância do serviço e o grau de influências externas. Assim, quanto maior a quantidade e diversidade de equipamentos, maior deve ser a frequência da manutenção.

Em relação à competência das pessoas que podem realizar essas manutenções, a NBR 5410 determina que toda instalação elétrica deve ser verificada ou sofrer intervenções somente por pessoas advertidas ou qualificadas.

Pessoas advertidas são aquelas suficientemente informadas ou supervisionadas por pessoas qualificadas. Já as pessoas qualificadas são aquelas que têm conhecimentos técnicos ou experiência suficiente para evitar os perigos que a eletricidade pode apresentar.

A manutenção em sistema fotovoltaico, qualquer um deles, ocorre na prática em duas situações. A primeira, chamada manutenção preventiva, quando uma pessoa realiza uma intervenção de rotina no sistema, uma ação programada, como, por exemplo, a limpeza dos módulos fotovoltaicos e a poda de árvores para evitar sombreamentos. A outra se refere à correção de alguma avaria, de algo que não estava previsto, uma situação que causa a parada do sistema fotovoltaico, que exige uma manutenção corretiva. Quebra de algum módulo fotovoltaico, dano irreversível no inversor c.c./c.a. e baterias eletroquímicas com a capacidade esgotada são alguns motivos que exigem uma manutenção corretiva para que o sistema volte a operar normalmente.

É sobre a realização de manutenção em sistemas fotovoltaicos que tratam as fotos seguintes, expostas em forma de memória fotográfica de um prontuário elétrico. As fotos da figura 183 mostram duas atividades de manutenção preventiva, ambas realizadas em sistemas fotovoltaicos domiciliares instalados pelo LSF em uma comunidade ribeirinha na Amazônia. Na esquerda, a limpeza de um gerador fotovoltaico e na direita a limpeza de um abrigo para baterias. Nota-se a presença de duas pessoas na atividade de limpeza dos módulos, uma que limpa e outra que segura a escada para evitar quedas.

Figura 183: Manutenção de sistemas domiciliares – limpeza de módulos fotovoltaicos e do abrigo para baterias.

Na figura 184 aparecem duas fotos que ilustram situações de manutenção preventiva sendo realizadas em sistemas fotovoltaicos domiciliares instalados pelo LSF em uma comunidade quilombola na Ilha do Cardoso, Estado de São Paulo. A foto da esquerda mostra um morador limpando seu gerador fotovoltaico e a outra mostra a colocação de vaselina nos terminais das baterias, para protegê-las contra oxidação.

Figura 184: Manutenção de sistemas domiciliares – limpeza de módulos fotovoltaicos e colocação de vaselina nos bornes das baterias.

A figura 185 mostra uma manutenção preventiva sendo realizada em um sistema fotovoltaico conectado à rede do LSF, no caso a lavagem de um seguidor solar de dois eixos com módulo de concentração. Devido à dimensão do sistema, optou-se pelo uso de uma plataforma elevatória acionada por mecanismos pneumáticos. O uso de andaimes e escadas nessa situação torna os trabalhos menos eficientes, porém realizáveis.

Figura 185: Manutenção de sistemas conectados à rede elétrica – lavagem dos módulos fotovoltaicos de concentração.

A figura 186 mostra uma ocasião na qual está sendo executada uma manutenção corretiva em um sistema fotovoltaico domiciliar de uma comunidade. Nessa foto aparece um técnico local, treinado pelo LSF, realizando a troca de um controlador de carga avariado. É importante mencionar que no almoxarifado dessa comunidade existem peças de reposição e o técnico local foi capacitado para conseguir realizar as substituições quando necessário. Depois, o material avariado é recolhido pela equipe do LSF para conserto.

Figura 186: Manutenção de sistemas domiciliares – substituição do controlador de carga e descarga.

A figura 187 mostra uma ocasião onde um técnico local recebe treinamento para realizar uma manutenção corretiva em um sistema fotovoltaico para bombeamento de água, instalado pelo LSF em uma comunidade indígena Ticuna no Alto Rio Solimões. Nesse caso, a bóia que verifica o nível da caixa de água se danificou e o sistema parou de bombear água. Após o reparo da bóia, realizou-se a limpeza da caixa de água antes de colocar o sistema para funcionar novamente.

Figura 187: Manutenção de sistemas para bombeamento de água – reparo de boia.

A instalação de sistemas fotovoltaicos requer conhecimentos nas áreas de elétrica, hidráulica e civil, além dos específicos em energia solar fotovoltaica. Isto devido à existência de elementos construtivos e tubulações para a passagem de água.

As atividades relacionadas com a instalação dos equipamentos fotovoltaicos envolvem tarefas como, por exemplo, o correto posicionamento e interconexão de módulos fotovoltaicos, interligações de baterias, parametrizações de conversores de frequência e inversores bidirecionais e comissionamento do sistema fotovoltaico.

As obras civis necessárias para operacionalidade do sistema envolvem questões como: perfuração de poço de água; construções de abrigos para quadros elétricos e baterias; montagem de estruturas para sustentação de caixa de água e

módulos fotovoltaicos; e instalação de tubulações hidráulicas para conexão de motobomba, caixa de água e sistema de distribuição da água bombeada.

Para a realização das atividades de instalação dos sistemas fotovoltaicos descritos neste trabalho, impõe-se a utilização de materiais e ferramentas apropriados para a tecnologia fotovoltaica. As tabelas 28 e 29 mostram uma lista genérica de materiais e ferramentas normalmente utilizados na instalação de sistemas fotovoltaicos. Os materiais e ferramentas específicos para cada aplicação fotovoltaica são mostrados adiante.

Tabela 28: Lista genérica de materiais utilizados na instalação de sistemas fotovoltaicos.

Materiais	Função
Módulos fotovoltaicos	Converter energia solar em eletricidade. A associação de módulos fotovoltaicos constitui um arranjo fotovoltaico.
Estrutura de fixação para o arranjo fotovoltaico	Prover a sustentação mecânica e a correta orientação e inclinação do arranjo fotovoltaico.
Condutores elétricos	Conectar eletricamente os diversos componentes de um sistema fotovoltaico.
Conectores elétricos	Prover terminações elétricas compatíveis com os terminais de entrada e saída dos diversos componentes de um sistema fotovoltaico.
Eletrodutos e eletrocalhas	Abrigar os condutores elétricos protegendo-os contra as condições ambientais do local da instalação. Cabos de energia e de sinal não podem ser instalados no mesmo eletroduto.
Dispositivos de seccionamento e proteção	Possibilitar o desligamento da instalação e proteger os circuitos elétricos contra sobre correntes e curtos-circuitos.
Dispositivos de Proteção contra Surto elétrico (DPS)	Proteger os circuitos elétricos contra tensões induzidas por descargas atmosféricas.
Barra de equipotencialização	Igualar potenciais de condutores elétricos que possuem a mesma função, evitando circulação de correntes elétricas indesejadas e protegendo as pessoas contra choque elétrico.
Haste de aterramento	Realizar contato elétrico entre partes da instalação e o solo para garantir o correto funcionamento do sistema e a segurança das pessoas.

Medidor de energia elétrica	Realiza as medições de energia elétrica. Este equipamento depende do padrão da concessionária de energia elétrica local.
Quadros elétricos	Abrigar e proteger os componentes de seccionamento, proteção, condicionamento de potência e medição de um sistema fotovoltaico.
Materiais diversos (pregos, grampos, roldanas, parafusos, porcas, arruelas, buchas, prensa-cabos, silicone, abraçadeiras de ferro e de <i>nylon</i> , vaselina, lixa, limas, escova de aço, entre outros)	Fixar os componentes de uma instalação em lugares apropriados. Agrupar feixes de cabos, finalizar acabamento da instalação. Limpar e proteger contatos elétricos.

A tabela 29 mostra a lista de materiais específicos para a instalação de sistemas fotovoltaicos em situações mais particulares.

Tabela 29: Lista específica de materiais para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Materiais elétricos específicos
<p>Conversor de frequência; cabos de sinal blindados para o barramento de dados; transformador; quadro de transferência; aquisição, armazenagem e envio de dados; computador para conectar certos aparelhos de monitoramento.</p> <p>Para os sistemas autônomos deve-se parametrizar o conversor de frequência. Para os sistemas conectados em minirredes ou rede elétrica convencional o quadro elétrico é o mesmo.</p>
Materiais hidráulicos
<p>Quantidade de tubulação suficiente para levar a água desde a motobomba, instalada no fundo do poço, passando pela elevação da caixa de água e finalizando com a rede de distribuição de água até os pontos de entrega. Para dessalinização de água deve-se prever dois reservatórios, um para a água a ser tratada e outro para o rejeito, além de peças sobressalentes para reposição dos filtros de particulados e com carvão ativado.</p> <p>Canos, curvas, luvas e registros de diferentes diâmetros, hidrômetro, caixa de água, bóia, torneiras, mangueiras, tambor com água para testes na motobomba antes de descê-la ao poço, filtros de água, fita <i>teflon</i>, cola, lixa, entre outros.</p>
Materiais para obras civis
<p>Cimento, areia, pedra, ferragens, gesso, massa corrida, tinta e verniz para realizar as obras civis e dar o acabamento final na instalação. Materiais para realizar as atividades de passagem das tubulações de água e elétrica; instalação da malha de aterramento; montagem da estrutura de sustentação da caixa de água; perfuração e envelopamento do poço ou construção de outro tipo de captação de água; construções do abrigo para o quadro elétrico e da cerca para restrição de acesso às pessoas não autorizadas. Na minirrede, construção da casa de força e da rede de distribuição.</p>
Materiais diversos
<p>Mapas com as curvas de nível do local e com as localizações dos pontos de captação, armazenagem e distribuição da água; documentação da obra; e cadastro dos prestadores de serviço.</p>

Para visualização dos materiais citados nas tabelas anteriores, vejam-se as fotos mostradas ao longo do texto.

Tabela 30: Lista genérica de ferramentas utilizadas na instalação de sistemas fotovoltaicos.

Ferramentas, instrumentos e acessórios	Descrição
Bússola ou GPS	Verificar a localização do ponto cardinal Norte e auxiliar na determinação do local da instalação e no posicionamento do arranjo fotovoltaico.
Medidor de ângulos	Auxiliar na correta instalação do arranjo fotovoltaico quanto à inclinação.
Multímetro	Medir as tensões, correntes, frequência e resistências elétricas na instalação fotovoltaica.
Furadeira e brocas de diversos diâmetros	Auxiliar na fixação dos diversos componentes de uma instalação.
Trena	Medir as distâncias entre os componentes de uma instalação para especificar a quantidade de cabos elétricos, entre outros.
Nível	Auxiliar na fixação horizontal e vertical de quadros elétricos, eletrodutos e estruturas.
Descascador de fio e estilete	Auxiliar na realização de emendas elétricas.
Alicates de corte, de bico e universal	Auxiliar nas tarefas de uso geral.
Tesoura e serra	Cortar e serrar materiais diversos.
Fita isolante e de autofusão	Isolar as emendas elétricas e partes vivas acessíveis.
Escada ou andaime	Possibilitar os trabalhos em altura.
Chaves de fenda, estrela e <i>torx</i>	Fixar parafusos de diversos tipos.
Chaves de boca e tipo tubo	Fixar parafusos e porcas de diversos tipos.
Chave inglesa e chave grifo	Apertar/afrouxar diversas conexões.
Martelo	Auxiliar na fixação dos diversos componentes e acessórios do sistema, entre outros.
Escavadeira manual, picareta ou pá	Auxiliar na abertura de buracos no solo para instalação das estruturas de fixação de componentes que serão instalados sobre o terreno.
Marreta, ponteira e talhadeira	Auxiliar na preparação do local da instalação fotovoltaica, eventualmente é necessário realizar algum tipo de obra civil.

Colher de pedreiro e desempenadeira	Auxiliar no acabamento de uma eventual obra civil no local da instalação fotovoltaica.
Materiais diversos (máquina fotográfica, caderno de anotações, manuais de todos os equipamentos da instalação, caixa de ferramentas, carrinho de mão, entre outros)	Registrar visualmente as diversas etapas da instalação do sistema fotovoltaico. Registrar fisicamente as informações importantes da instalação. Instalar e programar corretamente os equipamentos. Abrigar e transportar as ferramentas e materiais.
Luvras de diferentes tipos, botas apropriadas para trabalhos envolvendo eletricidade, óculos de proteção, chapéu, filtro solar, vestimenta, cinto de segurança e cordas, materiais de primeiros socorros	Equipamentos de proteção individual, exigidos pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), que auxiliam na segurança dos trabalhadores. Atenção especial para trabalhos realizados em altura, sob Sol intenso e em lugares com incidência de doenças tropicais.

A Tabela 31 mostra o ferramental específico necessário para a instalação de sistemas fotovoltaicos para bombeamento e tratamento de água e produção de gelo.

Tabela 31: Lista específica de ferramentas para a instalação de sistemas fotovoltaicos.

Verificação de temperatura
Câmera termográfica, termômetro e sensores de temperatura.
Infraestrutura de acesso das pessoas e materiais
Infraestrutura para acessar o local do poço com os materiais, as ferramentas e os equipamentos usados para perfurar o poço e instalar o sistema fotovoltaico de bombeamento. O transporte deve prever o deslocamento de materiais pesados e de grandes dimensões, como estruturas de sustentação, módulos fotovoltaicos, caixas de água, tubulações, tambores, entre outros. Normalmente, a logística de suprimento deve prever a utilização, dependendo de cada caso, de barcos de médio porte, balsa, caminhão, plataforma elevatória, máquina perfuratriz e de solda.

A figura 188 mostra as principais ferramentas listadas nas tabelas precedentes.

Figura 188: Instalação de sistemas fotovoltaicos – principais ferramentas.

A figura 189 mostra as principais ferramentas e os instrumentos de medição imprescindíveis para uso em sistemas fotovoltaicos.

Figura 189: Instalação de sistemas fotovoltaicos – ferramentas e instrumentos.

A figura 190 mostra as principais ferramentas para trabalhos envolvendo água, sejam eles bombeamento ou tratamento.

Figura 190: Instalação de sistemas fotovoltaicos – ferramentas de hidráulica.

A figura 191 mostra as ferramentas usadas para as obras civis requeridas para as atividades de instalação de sistemas fotovoltaicos.

Figura 191: Instalação de sistemas fotovoltaicos – ferramentas de construção civil.

Esta tese mostrou diferentes tipos de sistema fotovoltaico, bem com as ferramentas, os materiais e os procedimentos utilizados para a sua instalação e gestão. Com base em tudo que foi dito, pode-se partir para a discussão sobre o processo de certificação de instaladores para sistemas fotovoltaicos.

O objetivo do INMETRO, ao propor um programa de formação de instaladores de sistemas fotovoltaicos, é contribuir para a padronização de uma ementa de conteúdo que contenha saberes essenciais sobre as aplicações fotovoltaicas. De acordo com os lineamentos propostos pelo GT-FOT²⁸, as instituições com capacidade para ministrar cursos de formação de instaladores são as seguintes: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL); Centro de Treinamento da Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CT-CEMIG); Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Rio Grande do Sul (LES-UFRGS); Grupo de Fontes Alternativas da Universidade Federal de Pernambuco

²⁸ O Grupo de Trabalho Fotovoltaico (GT-FOT) é composto por universidades, centros de pesquisa, fabricantes de equipamentos, integradores de sistema e representantes do INMETRO. Esse grupo discute questões relativas aos testes de conformidade exigidos pelo INMETRO. Um dos resultados do trabalho desse grupo foi a elaboração da Portaria INMETRO 004/2011.

(FAE-UFPE); Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (LSF-IEE-USP); Grupo de Desenvolvimento de Alternativas Energéticas da Universidade Federal do Pará (GEDAE-UFPA); Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LabSolar-UFSC) e Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS).

O candidato à obtenção do certificado de instalador fotovoltaico deve possuir conhecimentos específicos sobre a instalação, operação e manutenções preventiva e corretiva. Estes conhecimentos são avaliados por meio de aplicação de provas teóricas e práticas. Também é averiguada a capacidade do candidato em passar instruções para auxiliares (montadores). O Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos é adotado como referencial básico para aferição dos conhecimentos (GTES, 2014).

O GT-FOT definiu o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL-RJ), pertencente à Eletrobrás, como a instituição responsável pela aplicação das provas. Para obter o certificado de instalador de sistemas fotovoltaicos de pequeno e médio porte – habilitação em sistemas energéticos autônomos – o candidato deve seguir o seguinte caminho:

1. Apresentar solicitação de aspirante ao certificado de instalador fotovoltaico de sistemas de pequeno e médio porte;
2. Obter aprovação na prova teórica;
3. Obter aprovação na prova prática;
4. Receber o certificado;
5. Incluir seu registro na Associação Brasileira de Empresas de Energias Renováveis como instalador qualificado.

Nas reuniões do GT-FOT definiram-se as instituições ministrantes e a avaliadora, mas o conteúdo programático ainda não está definido. O INMETRO está aguardando as instituições participantes apresentarem suas propostas para, então, propor ao GT-FOT a definição de um conteúdo oficial, que provavelmente será formado por uma síntese de todas as ementas apresentadas.

Na época de elaboração desse programa pelo GT-FOT, no ano de 2003, as instalações elétricas que usavam energia solar eram, em sua grande maioria, sistemas fotovoltaicos domiciliares de pequeno porte. Naquele tempo, as principais aplicações da energia solar fotovoltaica se limitavam aos sistemas isolados para eletrificação de residências no meio rural. Nos dias atuais, com todo o avanço técnico e jurídico que torna mais competitivo o uso da energia solar em várias situações, inclusive nos centros urbanos, torna-se necessário incluir na proposta inicial do GT-FOT uma ementa que contemple a certificação de instaladores para os outros sistemas fotovoltaicos.

Com o propósito de contribuir para a elaboração de um conteúdo programático que abarque essas novas exigências de capacitação de recursos humanos, as tabelas a seguir apresentam a proposta do LSF para qualificação de profissionais.

A tabela 32 mostra uma sugestão de conteúdo programático para ser utilizada em cursos de nivelamento, antes de se aprofundar em questões específicas de cada sistema. Isso se faz necessário porque a formação dos profissionais para atuar nas aplicações de sistemas fotovoltaicos exige conhecimentos gerais sobre eletricidade, além dos específicos da tecnologia fotovoltaica.

Tabela 32: Conteúdo programático - nivelamento.

Etapas	Conteúdo programático
Fundamentos básicos de eletricidade	1.1. Identificação dos componentes de um sistema fotovoltaico (módulos, bateria, controlador, inversor, medidor e elementos de proteção) conhecendo suas principais características e funções. 1.2. Identificação e manipulação de ferramentas para utilizá-las nas atividades de instalação e manutenção. 1.3. Compreensão das variáveis elétricas tensão, corrente, resistência e potência. 1.4. Aprendizagem do uso do multímetro principalmente para medir tensão, corrente, frequência e continuidade. 1.5. Diferenças entre materiais isolantes e condutores. 1.6. Percepção dos perigos ao manipular sistemas com energia elétrica (choque elétrico) e aprendizagem e aplicação dos procedimentos de segurança.
Compreensão do funcionamento do sistema fotovoltaico	2.1. Visão geral do funcionamento de um sistema fotovoltaico domiciliar como um todo. 2.2. Aprendizagem da função do controlador eletrônico de carga e do inversor c.c/c.a. 2.3. Manipulação do multímetro medindo os valores da tensão no quadro elétrico (bateria, módulo fotovoltaico e carga) e nas tomadas e lâmpadas do

	<p>sistema fotovoltaico domiciliar.</p> <p>2.4. Identificação e interpretação dos sinais luminosos e sonoros emitidos pelo controlador de carga e inversor.</p> <p>2.5. Identificação dos problemas mais simples que aparecem no quadro elétrico principalmente nos disjuntores, controlador de carga e inversor, e apresentação das possíveis soluções.</p>
Manutenção preventiva e corretiva	<p>3.1. Realização de atividades relacionadas com a manutenção preventiva (reposição de água nas baterias, limpeza e orientação dos módulos, desarme do interruptor diferencial, limpeza do abrigo das baterias e re-aperto nas conexões de todos os componentes).</p> <p>3.2. Aprendizagem de como solucionar problemas relacionados com as lâmpadas, circuito aberto, mau contato, curto-circuito e disjuntor defeituoso.</p> <p>3.3. Aprendizagem das atividades relacionadas com a troca de equipamentos do quadro elétrico: disjuntores, controlador de carga e inversor.</p> <p>3.4. Ensino dos critérios usados para escolher eletrodomésticos de baixo consumo utilizados nos sistemas fotovoltaicos, ressaltando conceitos como consumo, potência e durabilidade da bateria.</p>
Acumuladores de energia elétrica	<p>4.1. Aprendizagem do funcionamento de uma bateria eletroquímica de chumbo-ácido.</p> <p>4.2. Aprendizagem de como verificar o estado de carga das baterias, como fazer sua manutenção preventiva (limpeza de contatos e reposição de água) e como trocá-las por outras.</p>
Treinamento	<p>5.1. Realização de instalações de sistemas fotovoltaicos domiciliares pelos próprios alunos.</p>

A tabela 33 mostra uma ementa que aborda os materiais, os componentes e alguns conhecimentos mais específicos sobre a tecnologia fotovoltaica.

Tabela 33: Conteúdo programático – componentes e sistemas fotovoltaicos.

Etapa	Conteúdo programático
Conceitos básicos de eletricidade	<p>1.1. Conceitos fundamentais: lei de Ohm, potência elétrica, associações elétricas série e paralelo.</p> <p>1.2. Acumuladores: descrição, tipos de acumuladores e capacidade em Ah.</p> <p>1.3. Corrente contínua e corrente alternada.</p> <p>1.4. Cabos e fios.</p> <p>1.5. Instrumentos de medição.</p>
Introdução e definições	<p>2.1. O que é um sistema fotovoltaico?</p> <p>2.2. Componentes de um sistema fotovoltaico: módulos fotovoltaicos, acumuladores de chumbo-ácido, controladores de carga, inversores c.c./c.a., conversores de frequência e equipamentos de uso final.</p> <p>2.3. Noções de radiação solar.</p>
O módulo fotovoltaico	<p>3.1. Características e tipos de módulos: caixas de conexão, diodo de bloqueio e diodo de <i>by-pass</i>.</p> <p>3.2. Interconexão de módulos.</p> <p>3.3. Estruturas de fixação e suporte.</p>
Acumuladores	<p>4.1. Construção.</p> <p>4.2. Ciclos de carga e descarga.</p> <p>4.3. Capacidade em Ah e em Wh.</p> <p>4.4. Comportamento da bateria em uma instalação fotovoltaica.</p> <p>4.5. Nível de carga.</p> <p>4.6. Fatores que afetam a tensão.</p> <p>4.7. Fatores que afetam a capacidade.</p> <p>4.8. Fatores que afetam a vida útil das baterias.</p> <p>4.9. Conexão e interligação de baterias.</p>
Controladores de	<p>5.1. Princípio de funcionamento.</p>

carga	5.2. Tipos de controladores. 5.3. Verificação dos pontos de desconexão e reconexão de gerador fotovoltaico e da carga.
Inversor c.c./c.a.	6.1. Princípio de funcionamento. 6.2. Inversor c.c./c.a. para sistema isolado. 6.3. Inversor c.c./c.a. para sistema conectado à rede. 6.4. Inversor bidirecional.
Conversor de frequência	7.1. Princípio de funcionamento. 7.2. Explicação do diagrama em blocos do conversor de frequência. 7.3. Explicação dos parâmetros do conversor de frequência. 7.4. Parametrização do conversor de frequência em um sistema real. 7.5. Determinação dos ganhos proporcional, integral e derivativo do controlador PID do conversor de frequência. 7.6. Montagem de um quadro com conversor de frequência para bombeamento de água. 7.7. Montagem de um quadro com conversor de frequência para produção de gelo.
Outros componentes	8.1. Medidor de energia de quatro quadrantes. 8.2. Contadoras e relés. 8.3. Fusíveis, elementos de proteção e disjuntores. 8.4. Equipamentos de uso final. 8.5. Aterramento.
Instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos	9.1. Ações prévias à instalação: preparação do material e logística de transporte. 9.2. Etapas do processo de montagem: construção e montagem da estrutura de suporte, montagem dos módulos na estrutura de suporte, conexão dos módulos, conexão das baterias, transporte e manipulação de baterias, normas e procedimentos de segurança, montagem dos equipamentos de controle, quadro elétrico, instalação elétrica, cabos, fios, interruptores e luminárias. 9.3. Teste operacional da instalação (comissionamento). 9.4. Entrega da instalação (liberação para uso das pessoas). 9.5. Operações de manutenção preventiva e corretiva. 9.6. Localização e reparação de falhas simuladas nos sistemas usados em aula. 9.7. Segurança elétrica (NR-10). 9.8. Segurança em altura (NR-35). 9.9. Equipamentos de proteção individual e coletiva (EPI e EPC).

A tabela 34 apresenta uma sugestão de ementa de conteúdo para treinamento de recursos humanos em sistemas híbridos. Esse conteúdo programático foi elaborado durante o processo de montagem dos dois sistemas híbridos do LSF.

Tabela 34: Conteúdo programático – sistemas híbridos.

Etapas	Conteúdo programático
Sistemas híbridos Visão Geral	1.1. Estado da arte. 1.2. Normas técnicas aplicáveis. 1.3. Planejamento. 1.4. Instalação. 1.5. Gestão. 1.6. Monitoramento e controle.
	2.1. Geração fotovoltaica. 2.2. Geração diesel.

Descrição do sistema híbrido	2.3. Condicionamento de potência. 2.4. Armazenamento de energia. 2.5. Cargas utilizadas. 2.6. Instalação elétrica. 2.7. Proteção quanto à falha ou defeito.
Operação em sistema isolado	3.1. Estabilidade da minirrede. 3.2. Controle de tensão. 3.3. Controle de frequência.
Operação conectada à rede convencional	4.1. Fluxo reverso de potência. 4.2. Fator de potência. 4.3. Compensação de reativos.
Monitoramento e controle	5.1. <i>Hardware</i> . Relés e contadoras. Shunts e sensores. Fusíveis e disjuntores. <i>Data logger</i> . Medidores de energia. Circuitos de interface. 5.2. <i>Software</i> . Descrição de funcionamento. Rotinas implementadas. Protocolos de comunicação. Controle de carga. Controle de despacho. Análise de transitórios.
Gestão da minirrede	6.1. Operação em sistema isolado. Estratégia para funcionamento do diesel. Estratégia para controle do estado de carga da bateria. Estratégia para gerenciamento da carga. 6.2. Operação conectado a rede elétrica. Estratégia para conexão à rede. Estratégia para comercialização de energia. Rotinas de manutenção. 6.3. Treinamento do operador da minirrede.
Critérios de decisão entre MIGDI e SIGFI	7.1. Análise sob a perspectiva do desenvolvimento rural integrado. 7.2. SIGFI e a comunidade. 7.3. Minirrede e a comunidade. 7.4. Dados de monitoramento de SIGFIs. 7.5. Dados de monitoramento da minirrede. 7.6. Análise econômico-financeira. 7.7. Simulações e resultados. 7.8. Avaliação das vantagens e desvantagens de cada alternativa.

Como comentado, o GT-FOT ainda não oficializou um conteúdo programático para formação de instaladores de sistemas fotovoltaicos, espera-se que as ementas apresentadas possam contribuir para criação de uma política instrutiva no setor.

3.4.3 Pesquisa e desenvolvimento

O trabalho de pesquisa e desenvolvimento é tradicionalmente promovido por universidades e institutos de pesquisa científica, oferecendo como resultado o

aumento do acervo de conhecimentos. A pesquisa que tem como finalidade o desenvolvimento de uma tecnologia tem seu foco em suas aplicações, com o objetivo de transformar os resultados em produtos, serviços e processos ou ainda aplicá-los no contexto ambiental ou social. Esses resultados podem variar de acordo com o objetivo estratégico da parte envolvida no processo de capacitação tecnológica, podendo ser lucro, no caso das empresas, ou difusão do conhecimento, no caso das universidades (ADES, 2013).

O Brasil tem enorme potencial para o desenvolvimento de pesquisas em energia solar fotovoltaica. Além da real necessidade de expansão e socialização do acesso à energia elétrica, o país possui 90% das reservas mundiais economicamente aproveitáveis de Silício, material usado nos sistemas fotovoltaicos (CGEE, 2010). Portanto é importante desenvolver uma estratégia visando elevar a quantidade de profissionais com competências específicas para realizar pesquisas básicas e aplicadas e difundir os conhecimentos técnico-científicos fundamentais para promover o desenvolvimento tecnológico compatível com a realidade nacional.

Os avanços na esfera regulatória na última década criaram condições favoráveis para a inovação tecnológica na área, no entanto são encontradas muitas dificuldades para criar ações coordenadas capazes de garantir condições de estrutura adequadas para promover pesquisas e possibilitar que os resultados adquiridos não fiquem restritos ao universo acadêmico.

A Unidade de Capacitação Tecnológica surgiu com o objetivo de ser um local para centralização e difusão do saber e da prática sobre energia solar fotovoltaica, cumprindo a proposição de disseminar conhecimento e qualificar mão de obra para a área. As diretrizes da Unidade levam sempre em conta quais são as principais áreas de pesquisa e desenvolvimento necessárias para o setor, como: agrupar e disponibilizar os conhecimentos gerados nas atividades de pesquisa atuando na transferência de conhecimentos; manter cadastro de grupos de pesquisa capacitados para participar de projetos de pesquisa na área; disponibilizar ferramentas empregadas no desenvolvimento da tecnologia; contribuir para a formação de recursos humanos qualificados para atuar em pesquisa e desenvolvimento; interagir com centros de pesquisa e empresas da área

para garantir troca de informações; promover a execução de projetos de P&D e disponibilizar apoio para captação de recursos; promover acordos de cooperação com países desenvolvidos em tecnologia fotovoltaica visando atualização permanente; e definir linhas de pesquisa estratégicas (CGEE, 2010).

Uma das estratégias para a difusão dos resultados obtidos pelas pesquisas realizadas na Unidade de Capacitação Tecnológica do LSF-IEE-USP é a publicação de artigos e a apresentação de trabalhos em seminários e congressos acadêmicos, práticas habituais na academia para transmissão e troca de conhecimento entre pares. Na modalidade de congressos e encontros nos quais habitualmente o tema é tratado, identificam-se alguns eventos que vêm recebendo ao longo do tempo os trabalhos produzidos por pesquisadores brasileiros e estrangeiros que abordam o tema da energia solar fotovoltaica. São eles Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS), Conferência Latino Americana da *International Solar Energy Society* (ISES) e Seminários de Difusão, alguns desses transmitidos pela *internet*.

A escassez de profissionais especialistas pode ser verificada em todas as esferas de atuação necessárias ao empreendimento fotovoltaico, dessa forma é preciso qualificar recursos humanos também para pesquisa e desenvolvimento, contribuindo para que o Brasil alcance os benefícios inquestionáveis que a tecnologia pode promover para o desenvolvimento sustentável do país. Existem várias iniciativas isoladas, mas há necessidade de maior integração entre os centros de pesquisa, empresas e governo, para gerar benefícios competitivos.

As atividades de pesquisa e desenvolvimento estão relacionadas à vocação de cada grupo de pesquisa. No levantamento realizado nesta tese sobre as instituições²⁹ que desenvolvem atividades na área de energia solar fotovoltaica no Brasil, pode-se identificar algumas que possuem resultados concretos em certas áreas de atuação, tais como: medição da radiação solar; produção de células e módulos fotovoltaicos; modelos matemáticos e *softwares* para simulação do comportamento de módulos fotovoltaicos; ensaios em equipamentos fotovoltaicos; eletrificação rural por meio de SIGFI e MIGDI; bombeamento de água; tratamento de água; e produção de gelo.

²⁹ As instituições pesquisadas foram: INPE, UFPE, PUC-RS, UFRGS, CEPEL, CPqD, UFSC, GEDAE e LSF.

Para exemplificar uma atividade de P&D, as fotos da figura 192 mostram um sistema eletrônico para automatizar testes em controladores de carga e inversores que está sendo desenvolvido no LSF. Esse sistema foi concebido para tornar mais eficiente os ensaios de etiquetagem do INMETRO. Um desses ensaios, por exemplo, tem a duração de cinco horas, o que exige um técnico acompanhando o teste durante esse período, anotando os valores dos instrumentos de medição, modificando os valores nas fontes de tensão e corrente e, no final, emitindo o relatório.

O sistema de automação realiza essas atividades de maneira autônoma. Ele possui quatro barramentos para comunicação de dados (*internet*, GPIB, serial RS-232 e USB) que possibilitam o envio de comandos para as fontes de tensão e corrente, a leitura das medições realizadas pelos instrumentos de medição e o acionamento de contadoras para energizar cargas e polarizar circuitos.

Essa automação da bancada de ensaios evita que o técnico que executa o teste de etiquetagem tenha que ficar à disposição do ensaio. Em vez disso, ele realiza a montagem do equipamento a ser testado na bancada automatizada e observa o andamento do ensaio pela tela de um computador. O sistema armazena as variáveis no computador e ao final consolida os dados em forma de relatório.

Figura 192: Pesquisa e desenvolvimento – automação de bancada para ensaios.

Outra atividade de pesquisa que está sendo realizada no LSF trata do desenvolvimento de uma bancada para ensaios em sistemas fotovoltaicos para bombeamento de água com potências até 10 CV, atualmente a bancada existente permite ensaios em motobombas até 2 CV. Maiores informações sobre os projetos

de P&D nos quais o LSF participa podem ser encontradas na página eletrônica do laboratório³⁰.

³⁰ A página eletrônica do LSF está disponível em <http://lsf.iee.usp.br>.

Conclusão

O potencial da energia solar fotovoltaica como alternativa efetiva ao uso de combustíveis fósseis, dentro da matriz energética, já é conhecido. O Brasil é um país que reúne alguns dos principais ingredientes para essa mudança de paradigma energético: boa radiação solar, abundância de Silício, pesquisas e estudos avançados sobre o tema e a real necessidade de diversificar a matriz elétrica.

Apesar do pouco investimento governamental para que haja essa virada no mercado energético, o interesse pela energia solar cresceu no país. Empresas, institutos e universidades, amparados por uma nova base legal e regimental, passaram a investir nesta tecnologia e a expandir os seus usos. Se antes a energia solar era comum em regiões remotas, para uso rural, hoje já não é tão raro encontrar diferentes aplicações nos centros urbanos.

Esse aumento na demanda trouxe à tona um gargalo do sistema: a falta de mão de obra qualificada para atuar nas diversas etapas de um processo de eletrificação com energia solar fotovoltaica. Muitas experiências mostraram que a má instalação, falta de manutenção correta ou até mesmo erros na disseminação do conhecimento sobre o tema trouxeram grandes prejuízos para que a tecnologia se tornasse mais acessível e recebesse mais investimentos.

Existem diversos trabalhos que apontam para a necessidade de investimento em qualificação de recursos humanos para a efetivação do uso de sistemas fotovoltaicos no país. A partir da leitura desses trabalhos, percebe-se que enquanto houver tal empecilho, que dificulta a difusão de sistemas fotovoltaicos, não haverá interesse financeiro na produção de matéria prima e de módulos por parte de empresas privadas, uma vez que não existe ainda mercado consumidor.

Este trabalho foi feito dentro deste contexto e, recorrendo às experiências de qualificação de recursos humanos acumuladas em mais de 18 anos de atuação do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (LSF-IEE-USP), dispõe-se a aprofundar as discussões sobre as metodologias utilizadas para capacitação profissional e socialização do conhecimento produzido nas instituições de pesquisa. Outro apontamento desta

tese é a necessidade da padronização de procedimentos e das normas para instalação e manutenção dos sistemas fotovoltaicos.

A hipótese de que o estabelecimento de estrutura laboratorial para qualificação de recursos humanos e a socialização de procedimentos técnicos padronizados são instrumentos que potencializam a difusão das aplicações fotovoltaicas foi confirmada. No entanto, é preciso esclarecer alguns pontos. O primeiro refere-se à estrutura laboratorial do LSF, que da forma como se encontra atualmente é difícil de ser replicada. Nesse sentido, cabe lembrar de sua criação, em 1995, quando contava apenas com infraestrutura básica, ferramentas essenciais e o esforço de pessoas. Logo, uma expectativa desta tese é esclarecer que o mais importante quando se pensa em capacitação de estrutura laboratorial e qualificação de profissionais em energia solar fotovoltaica são os recursos humanos.

Os maiores responsáveis pela efetivação dos sistemas fotovoltaicos do LSF foram os pesquisadores e profissionais que contribuíram com seus trabalhos, que resultaram em 9 teses de doutorado; 20 dissertações de mestrado; participação em grupos da ABNT, INMETRO, ABINEE, entre outros; energização de comunidades isoladas, com transferência de tecnologia para os usuários; centenas de visitas guiadas; mais de 300 relatórios técnicos emitidos, dos quais aproximadamente uma centena com acreditação ISO/IEC 17025; relatórios de viagens; participação em seminários de difusão com governos, empresas e demais interessados; informações disponibilizadas na página da *internet*; entre outras formas de divulgação da energia solar fotovoltaica.

Para que haja uma efetiva qualificação profissional é necessária uma estrutura laboratorial mínima, de acordo com o campo de atuação profissional. O fato de que a tese pôde utilizar os conhecimentos científicos, técnicos e didáticos, acumulados ao longo de anos por diferentes pesquisas na Unidade, para compartilhar informações sobre como qualificar os profissionais requeridos para atuarem nas diversas etapas de implementação de projetos (planejamento, instalação e gestão dos sistemas) contribui na medida em que o aprendizado se torna mais eficiente quando são utilizados sistemas fotovoltaicos reais no processo

de treinamento das equipes técnicas, com protótipos idênticos aos utilizados em campo em iniciativas de eletrificação.

A função da Unidade de Capacitação, tratada por este trabalho, é de produzir conhecimento técnico para que seja possível a padronização de procedimentos, de usos de equipamentos e de trabalho, dentro da área de energia solar fotovoltaica. As experiências adquiridas nos laboratórios, nos diversos ensaios e testes realizados, demonstram que para que o setor se torne relevante dentro da matriz energética brasileira é necessário algum tipo de padronização e fiscalização. Esta tese difundiu o conhecimento produzido por anos de experiência, em um ambiente estruturado, com profissionais capacitados.

A compilação de procedimentos, ferramental e requisitos mínimos que um profissional deve possuir para atuar na área de sistemas fotovoltaicos é uma forma de levar os conhecimentos produzidos na academia para diversos contextos escolares e profissionais, contribuindo na elaboração e no oferecimento de cursos técnicos e profissionais com propostas de qualidade, que possam contribuir com a disseminação da energia fotovoltaica e com as políticas de qualificação profissional do país. Os *kits* apresentados nesta tese como instrumento de capacitação mostraram-se boas ferramentas pedagógicas, que podem ser reproduzidos em unidades móveis, como as existentes no SENAI e no Centro Paula Souza.

Como desdobramentos resultantes desta tese para a sociedade pode-se citar as tratativas que se iniciaram com o Centro Paula Souza, responsável pela administração das Escolas Técnicas Estaduais (ETEC), para inclusão do conteúdo curricular apresentado nesta tese ao ementário do Curso Técnico de Eletrotécnica. O curso técnico em eletrotécnica contém os conhecimentos necessários para instalação de sistemas fotovoltaicos, a inclusão de alguns conteúdos em seu ementário e de aulas práticas com sistemas fotovoltaicos contemplaria os conhecimentos necessários para qualificar profissionais em energia solar fotovoltaica. Além disso, o LSF-IEE-USP está assessorando o SENAI do Rio Grande do Norte, por intermédio do *CT-Gás e Energias Renováveis*, na estruturação laboratorial para a realização de ensaios em componentes fotovoltaicos em ambiente acreditado pela norma ISO/IEC 17025.

As contribuições para a infraestrutura laboratorial do LSF-IEE-USP desenvolvidas durante este trabalho de tese foram as instalações de dois sistemas híbridos para geração de energia do tipo fotovoltaico-diesel-rede elétrica, um monofásico e outro trifásico. Essas minirredes são uma boa ferramenta didática para capacitar recursos humanos aptos a atuar na instalação de uma grande variedade de sistemas fotovoltaicos. Os aprendizados obtidos durante o processo de concepção, montagem e comissionamento desses sistemas possibilitaram a criação de uma ementa de conteúdos para qualificação profissional em sistemas híbridos. Pôde-se constatar que os conhecimentos exigidos para o projeto e instalação desse tipo de sistema são os mais amplos dentre os sistemas fotovoltaicos apresentados nesta tese.

A capacitação de planejadores de iniciativas de eletrificação fotovoltaica em comunidades isoladas deve abranger questões de logística, comunicação social e conhecimento dos recursos disponíveis no entorno das comunidades beneficiadas. Nesse sentido, a experiência de institutos que desenvolvem pesquisas de campo é muito útil, pois a partir dela é possível sistematizar procedimentos essenciais.

Ficou demonstrado que a Unidade de Capacitação Tecnológica, instalada no LSF-IEE-USP e descrita nesta tese, exerceu dois papéis igualmente importantes: a) exemplo de local de ensino e extensão e b) padrão estrutural/laboratorial a ser seguido para fins de acreditação junto a organismos metrológicos.

Faz parte do conhecimento reunido e transmitido nesta tese o aprendizado de que a Universidade, em especial a pública, tem o dever de retribuir para a sociedade todo o investimento que é feito nela. Ficou atestado que o Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo entrega benefícios para a sociedade brasileira: laboratórios equipados para realizar testes, ensaios e pesquisas; e professores capacitados para ensinar novas habilidades e aumentar o repertório de profissionais. Além disso, transformar a vida de comunidades em trabalhos de extensão para melhoria de qualidade de vida e de renda é uma das mais significativas formas de retribuição. Algo que o LSF-IEE-USP tem feito ao longo de quase duas décadas.

O que se pretendeu ao trazer os resultados obtidos pelo Laboratório e pela Unidade de Capacitação, que estão reproduzidos nesta tese, é ser mais uma peça na

consolidação da energia solar fotovoltaica como uma alternativa eficaz e confiável ao cenário energético que se impõe no Brasil hoje. A energia solar fotovoltaica tem o potencial de se tornar a mais democrática e acessível de todas as fontes, espera-se que se esse trabalho contribua para que isso se torne realidade.

Referências bibliográficas

ABINEE. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.** Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, São Paulo, 2012.

ABNT. **NBR 5410 – Instalações elétricas de baixa tensão.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 1997.

ABNT. **NBR 17025 – Requerimentos gerais para laboratórios de ensaio e calibração.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

ABNT. **NBR 62116 – Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2012.

ABNT. **NBR 16149 – Sistemas fotovoltaicos (FV) – características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.

ABNT. **NBR 16150 – Sistemas fotovoltaicos (FV) — características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição: procedimento de ensaio de conformidade.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2013.

ADES, C. **Modelo de difusão da inovação para instituto de pesquisa no Brasil.** Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade/USP. Tese de doutorado, 2013.

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.** Programa de Pós-Graduação em Energia/USP. Dissertação de mestrado, São Paulo, 2012.

ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL 482/2012.** Diário Oficial, Brasília, 2012.

ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL 493/2012.** Diário Oficial, Brasília, 2012.

ANEEL. **PRODIST – Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional.** Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 2012.

BOUDENOT, J. C., **Histoire de la physique et des physiciens.** Editora Ellipses, Paris, França, 2001.

BRITO, A. U.; ZILLES, R. Conversores de frequência, uma solução para diminuir a dependência aos equipamentos importados em aplicações de bombeamento fotovoltaico. CD-ROM do **IV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético**, Itajubá, 2004.

BRITO, A. U.; ZILLES, R. Systematized Procedure for Parameter Characterization of a Variable-speed Drive Used in Photovoltaic Pumping Applications. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, V.14, n.3, p.249-260, 2006.

BRITO, A. U.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R. PV Pumping Systems: A Useful Tool to Check Operational Performance. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI:10.1002/pip.710, 2006.

BRITO, A. U. **Otimização do acoplamento de geradores fotovoltaicos a motores de corrente alternada através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Tese de doutorado, 2006.

CASTELLS, M. **A sociedade em rede**. Editora Paz e Terra, 7ª edição, São Paulo, 1999.

CGEE. **Energia solar fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, serie documentos técnicos 2, Brasília, 2010.

CONAMA. **Resolução CONAMA 401/2008**. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasília, 2008.

DOU. **Lei 10.438/2002**. Diário Oficial da União, Brasília, 2002.

DOU. **Lei 11.445/2007**. Diário Oficial da União, Brasília, 2007.

DRIEMEIER, C.; ZILLES, R. Six-element circuit for maximum power point tracking in photovoltaic-motor systems with variable-frequency drives. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/pip.949, 2010.

DRIEMEIER, C.; ZILLES, R. An ice machine adapted into an autonomous photovoltaic system without batteries using a variable-speed drive. **Progress in**

Photovoltaics: Research and Applications. Published online in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/pip.960, 2010.

EPIA. **Global market outlook 2013-2017 for photovoltaics.** European Photovoltaic Industry Association, 2013.

FEDRIZZI, M. C. **Fornecimento de água com sistemas de bombeamento fotovoltaicos: dimensionamento simplificado e análise de competitividade para sistemas de pequeno porte.** Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Dissertação de mestrado, 1997.

FEDRIZZI, M. C.; SAUER, I. L. Simple and useful instrumentation to determine the performance of PV pumping systems in the field. **Proceedings of 17th European Photovoltaic Energy Conference**, Munique, 2001.

FEDRIZZI, M. C. **Sistemas fotovoltaicos de abastecimento de água para uso comunitário: lições apreendidas e procedimentos para potencializar sua difusão.** Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Tese de doutorado, 2003.

FUNASA. **Impactos na saúde e no sistema único de saúde decorrentes de agravos relacionados a um saneamento ambiental inadequado.** Fundação Nacional de Saúde, Brasília, 2010.

GREENPEACE. **Revolução energética: a caminho do desenvolvimento limpo.** Greenpeace Internacional. Conselho Europeu de Energia Renovável, 2010.

GTES. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Grupo de Trabalho de Energia Solar, Rio de Janeiro, 2014.

IDEAL. **Pesquisa de cursos de capacitação para a área fotovoltaica no Brasil.** Instituto para o Desenvolvimento das Energias Alternativas na América Latina. Disponível em: <<http://www.americadosol.org>>. Acesso em 15/12/2013.

IEI. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil: panorama da atual legislação.** International Energy Initiative, 2009.

INMETRO. **Qualificação de instaladores de sistemas fotovoltaicos.** Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Programa Brasileiro de Etiquetagem, 2003.

INMETRO. **Portaria INMETRO 243/2009**. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Brasília, 2009.

INMETRO. **Portaria INMETRO 004/2011**. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Brasília, 2011.

LORENZO, E. **Electricidad solar – ingeniería de los sistemas fotovoltaicos**. Universidad Politécnica de Madrid, 1ª edição, Madrid, 1994.

LORENZO, E. P.; POZA, F. S.; FEDRIZZI, M. C.; ZILLES, R.; AANDAM, M.; ZAOU, S. **Boas práticas na implantação de sistemas de bombeamento fotovoltaico**. Ed. Instituto de Energía Solar - Universidad Politécnica de Madrid, Espanha, 2005.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering**. Wiley, 1ª edição, Inglaterra, 2003.

MACÊDO, W. N. **Estudo de sistemas de geração de eletricidade utilizando as energias solar fotovoltaica e eólica**. Dissertação de Mestrado. UFPA, Belém, 2002.

MACÊDO, W. N. **Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado à sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Tese de doutorado, 2006.

MACIEL, W. J. **Astronomia e astrofísica**. IAG/USP, São Paulo, 1991.

MARCUSE, H. Algumas implicações sociais da tecnologia moderna. In: MARCUSE, H. (Org. KELLNER, D.) **Tecnologia, guerra e fascismo**. São Paulo: Unesp, 1999. p. 73-104.

MME. **Guia de revitalização e capacitação do PRODEEM**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2004.

MOCELIN, A. R.; ZILLES, R.; MORANTE, F. Instalações fotovoltaicas domiciliares em comunidades que possuem geradores a diesel. **XI Congresso Brasileiro de Energia, v. 1. p. 363-374**, Rio de Janeiro, 2006.

MOCELIN, A. R. **Implantação e gestão de sistemas fotovoltaicos domiciliares: resultados operacionais de um projeto piloto de aplicação da resolução ANEEL Nº 83/2004**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Dissertação de mestrado, 2007.

MOCELIN, A. R.; ZILLES, R.; MORANTE, F. Programa brasileiro de etiquetagem de equipamentos fotovoltaicos: controladores de carga e inversores c.c./c.a. **XXXII Reunión de Trabajo de La Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente e XVIII Encuentro Asociación Internacional para la Educación en Energía Solar**, ASADES, Río Cuarto, Argentina, 2009.

MOCELIN, A. R.; ZILLES, R.; NOVGORODCEV, A. Programa brasileiro de etiquetagem: a utilização do simulador solar do IEE/USP na qualificação de módulos fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 1, Porto Alegre, 2011.

MOCELIN, A. R.; ZILLES, R. Unidade de capacitação e difusão de minirredes fotovoltaica-bateria-diesel-rede elétrica. **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES**, São Paulo, 2012.

MORALES, L. R. V.; MOCELIN, A. R.; ZILLES, R. Estado dos sistemas fotovoltaicos domiciliares instalados em uma comunidade ribeirinha amazônica após seis anos e meio de operação. **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES**, São Paulo, 2012.

MORANTE, F. B. T. **Demanda de energia elétrica e desenvolvimento socioeconômico : o caso das comunidades rurais eletrificadas com sistemas fotovoltaicos**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Tese de doutorado, 2004.

MORANTE, F. B. T.; MOCELIN, A. R.; ZILLES, R. Capacitación y transferencia tecnológica: su importancia en la sostenibilidad de los proyectos basados en la tecnología solar fotovoltaica. **II Conferencia Regional Latinoamericana de la International Solar Energy Society**, Buenos Aires, Argentina, 2006.

MTE. **Plano Nacional de Qualificação**. Ministério do Trabalho e Emprego, Brasília, 2003.

MTE. **Portaria GM 598/2004 – Instalações e serviços em eletricidade**. Ministério do Trabalho e Emprego, Diário Oficial da União, 2004.

MTE. **Portaria SIT 313/2012 – Trabalho em altura**. Ministério do Trabalho e Emprego, Diário Oficial da União, 2012.

OLIVEIRA, S. H. F. **Geração distribuída de eletricidade**: inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no Estado de São Paulo. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Tese de doutorado, 2002.

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.

PINTO NETO, A. F. C.; ALMEIDA, M. P.; 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, 2010.

PINTO NETO, A. F. C. **Qualificação e etiquetagem de inversores para sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Programa de Pós-Graduação em Energia/USP. Dissertação de mestrado, 2012.

ROSA, D. J. M. **Sistemas fotovoltaicos domiciliares de dessalinização de água para consumo humano: um estudo de sua viabilidade e configurações**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Tese de doutorado, 2013.

ROVERE, E. L. **A Carta do Sol - subsídios para o planejamento da promoção da energia solar fotovoltaica no Brasil**. Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente – PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.

SANTOS, R. R. **Procedimentos para eletrificação rural fotovoltaica domiciliar no Brasil: uma contribuição a partir de observações de campo**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Tese de doutorado, 2002.

SERPA, P. M. N. **Eletrificação fotovoltaica em comunidades caiçaras e seus impactos socioculturais**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia/USP. Tese de doutorado, 2001.

SUETA, H. E.; MOCELIN, A. R.; ZILLES, R.; OBASE, P. F.; BOEMEISEL, E. Protection of photovoltaic systems against lightning: experimental verifications and techno-

economic analysis of protection. **XII SIPDA – International Symposium on Lightning Protection**, Belo Horizonte, 2013.

TAYLOR, N. **Guidelines for PV power measurement in industry**. JRC Scientific and Technical Reports, Joint Research Centre - European Commission, Itália, 2010.

TCU. **Avaliação do Tribunal de Contas da União sobre o programa energia das pequenas comunidades**. Editora do TCU - Série sumários executivos, Brasília, 2003.

TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; BARBOSA, E. M. S. **Instalação de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água**. Editora universitária da UFPE, Recife, 1999.

TIBA, C. **Atlas solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres**. Editora Universitária da UFPE, Recife, 2000.

ZILLES, R.; MOCELIN, A.; MORANTE, F. Programa brasileiro de formação e certificação de instaladores de sistemas fotovoltaicos de pequeno e médio porte. **XXXII Reunión de Trabajo de La Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente e XVIII Encuentro Asociación Internacional para la Educación en Energía Solar**, ASADES, Río Cuarto, Argentina, 2009.

ZILLES, R.; MACÊDO, W. N.; GALHARDO, M. A. B; OLIVEIRA, S. H. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Editora Oficina de Textos, coleção aplicações da energia solar fotovoltaica, São Paulo, 2012.