Relatório de Pesquisa

Avaliação das Perspectivas de Desenvolvimento Tecnológico para a Indústria de Bens de Capital para Energia Renovável (PDTS-IBKER)

ABDI
Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

SBN Quadra 1 - Bloco B - Ed. CNC - 14º andar - Brasília/DF - Brasil - CEP: 70041-902
Contato: TEL: +55 61 3962.8700 | FAX: +55 61 3962.8715 | E-mail: abdi@abdi.com.br

ABDI
Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial

Avaliação das Perspectivas de Desenvolvimento Tecnológico para a Indústria de Bens de Capital para Energia Renovável (PDTS-IBKER)

Relatório de Pesquisa

Copyright © 2012 by Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE-UFRJ) & Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI)

Todos os direitos desta edição reservados ao IE-UFRJ e à ABDI

Coordenação Geral do Projeto Editorial: Fabio Stallivieri

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI

Supervisão
Maria Luisa Campos Machado Leal

Equipe Técnica
Claudionel Campos Leite
Valdênio Miranda de Araújo
Willian Cecílio de Souza

Gerência do Projeto Editorial: Carolina Dias

Editor: Jorge Gama
Produção Gráfica: Monique Bergmann Islanio
Assistente Editorial: Rosangela de Souza Bueno

CIP-BRASIL. CATALOGAÇÃO NA FONTE
SINDICATO NACIONAL DOS EDITORES DE LIVROS, RJ

Relatório de Pesquisa – Avaliação das Perspectivas de Desenvolvimento Tecnológico para a Indústria de Bens de Capital para Energia Renovável (PDTS-IBKER). / David Kupfer, Ricardo M. Naveiro, Rodrigo C. Sabbatini, Fábio Stallivieri (Coords.). – Brasília: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

269p.: il.; graf.; tab.

1. Indústria – bens de capital. 2. Energia renovável. 3. Desenvolvimento tecnológico. I. David Kupfer. II. Ricardo M. Naveiro. III. Rodrigo C. Sabbatini. IV. Fábio Stallivieri. V. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. VI. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Economia. VI. Relatório de Pesquisa.

SYNERGIA EDITORA

Livros técnicos, científicos e profissionais
Praça Amambaí, 18 – Engenho de Dentro – 20730-120 – Rio de Janeiro – RJ
Tel.: (21) 3273-8250 / 3624-4301
www.synergiaeditora.com.br – synergia@synergiaeditora.com.br

Equipe do Projeto

Coordenação Geral

Coordenador Geral: David Kupfer (IE/UFRJ)

Coordenador da Prospecção Tecnológica: Ricardo Manfredi Naveiro (POLI/UFRJ)

Coordenador dos Estudos Econômicos: Rodrigo Sabbatini (NEIT/UNICAMP e FACAMP)

Coordenador da Pesquisa de Campo: Fabio Stallivieri (ECO/UFF e GIC-IE/UFRJ)

Pesquisadores: Heloisa Vasconcellos de Medina (CETEM), Antonio Carlos Diegues (UFSCar), José Eduardo Roselino Jr (FACAMP)

Assistente de Pesquisa: Thiago de Holanda Lima Miguez (IE-UFRJ)

Comitê Técnico (por fonte de energia)

Solar e Fotovoltaica: Izete Zanesco (NT Solar/PUC-RS) e Arno Krenzinger (LES/UFRGS)

PCH: Geraldo Lucio Tiago Filho (CERPCH/UNIFEI) e Ernani Felippe Bepler (ex-Voith Siemens)

Biomassa: Electo Eduardo Silva Lora (NEST/UNIFEI) e Silvio Carlos Anibal de Almeida (POLI/UFRJ)

Eólica: José Tadeu Matheus (Wobben) e Ricardo Marques Dutra (CEPEL)

Gerente: Carolina Dias (CEMP/PUC-Rio e GIC-IE/UFRJ)

Coordenação Técnica

Grupo de Indústria e Competitividade do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Apoio Administrativo

Fundação Universitária José Bonifácio

Lista de Figuras e Tabelas

Capítulo 1

Figura 1.1 – Processamento dos resultados da pesquisa de campo

Tabela 1.1 – Membros do Comitê Técnico

Tabela 1.2 – Modelo de "cabeçalho" do questionário

Tabela 1.3 – Questões e possibilidades de respostas

Capítulo 2

Figura 2.1 – Componentes de um sistema fotovoltaico isolado

Figura 2.2 – Materiais de um sistema solar fotovoltaico à base de silício

Figura 2.3 – Árvore da composição de um aerogerador

Figura 2.4 – Torres

Figura 2.5 – Nacele

Figura 2.6 – Patentes concedidas USPTO

Figura 2.7 – Patentes por área do conhecimento

Figura 2.8 – Tecnologias de processamento e dos produtos

Figura 2.9 – Estado da arte das diferentes tecnologias para a geração de eletricidade em pequena escala, a partir da combustão de biomassa

Figura 2.10 – Faixas de potência das tecnologias para a geração de eletricidade partir de biomassa

Figura 2.11 – Eficiência elétrica das tecnologias de combustão de biomassa para a geração em pequena escala

Figura 2.12 – Principais componentes de uma caldeira aquatubular

Figura 2.13 – Composição do gás produzido

Figura 2.14 – Modelo de turbina S

Tabela 2.1 – Setores e produtos industriais da cadeia produtiva de energia solar fotovoltaica

Tabela 2.2 – Cadeia produtiva de energia solar fotovoltaica por segmentos da IBKER

Tabela 2.3 – Perspectivas tecnológicas: novas tendências mundiais

Tabela 2.4 – Tabela comparativo dos tipos de concentradores

Tabela 2.5 – Principais características dos três principais tipos de tecnologia

Tabela 2.6 – Segmentos, setores e produtos da cadeia produtiva de geração de energia

Tabela 2.7 – Cadeia produtiva da geração de energia elétrica eólica

Tabela 2.8 – Segmentos, setores e produtos da cadeia produtiva de termoelétricas a partir de biomassa

Tabela 2.9 – Classificação CNAE a partir de biomassa

Tabela 2.10 – A cadeia produtiva da termoeletricidade a partir de biomassa por segmentos da IBKER

Tabela 2.11 – Principais indicadores técnicos das novas tecnologias de geração de eletricidade a partir da combustão de biomassa

Tabela 2.12 – Energia a partir de biomassa: tecnologias, processos e componentes

Tabela 2.13 – Segmentos, setores e produtos da cadeia produtiva de geração de energia em Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs)

Tabela 2.14 – Cadeia produtiva da geração de energia elétrica em PCH

Tabela 2.15 – Desafios tecnológicos em PCH

Capítulo 3

Figura 3.1 – Cadeia simplificada de equipamentos fotovoltaicos: uma proposta analítica

Figura 3.2 – Mundo: distribuição das tecnologias de células FV, 2010 (em % da produção)

Figura 3.3 – Estrutura empresarial por elo da cadeia de equipamentos fotovoltaicos no mundo (número de empresas), 2009

Figura 3.4 – Produção mundial de células fotovoltaicas, 1999–2010 (em MW)

Figura 3.5 – Importações de células e módulos fotovoltaicos, Brasil, 2001–2010 (em US$ milhões)

Figura 3.6 – Distribuição geográfica da importação de células e módulos fotovoltaicos, 2010

Figura 3.7 – A cadeia simplificada de equipamentos aerogeradores

Figura 3.8 – Evolução da capacidade de geração de energia eólica no mundo, 1999–2010 (em GW)

Figura 3.9 – Distribuição geográfica da capacidade anual instalada de aerogeradores, mundo, 2003–2010 (em MW)

Figura 3.10 – Expansão anual esperada da capacidade de geração de energia eólica no Brasil, 2001–2013 (em MW)

Figura 3.11 – Rotas tecnológicas para a conversão da biomassa

Figura 3.12 – Fontes de geração de energia, Brasil e mundo

Figura 3.13 – Preços médios de contratação em leilões de energia para fontes alternativas, Brasil, 2005–2017

Figura 3.14 – Evolução da capacidade instalada em PCH, Brasil, 2001–2010 (em MW)

Quadro 3.1 – Empresas da IBKER segundo áreas e máquinas específicas

Tabela 3.1 – Eficiência das células fotovoltaicas em estágios comerciais por tipo de tecnologia

Tabela 3.2 – Preços de produtos da cadeia fotovoltaica nos EUA (exceto quando indicado), dezembro de 2011

Tabela 3.3 – Custos de capital para a instalação de plantas produtivas de escala economicamente viável, por elo da cadeia fotovoltaica, 2008 (em US$ milhões)

Tabela 3.4 – Mundo e países selecionados: capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica, 2006 e 2010 (em MW)

Tabela 3.5 – Produção de células fotovoltaicas por países, 2010 (em MW e %)

Tabela 3.6 – Maiores empresas mundiais de células fotovoltaicas, 2009–2010

Tabela 3.7 – Países selecionados: preços* de equipamentos para sistemas fotovoltaicos, 2010 e 2011

Tabela 3.8 – Usinas solares operando no Brasil*

Tabela 3.9 – Capacidade instalada de geração de energia eólica no final de 2010, mundo e países selecionados (em MW)

Tabela 3.10 – Incremento da capacidade instalada de geração de energia eólica no ano de 2010, mundo e países selecionados (em MW)

Tabela 3.11 – Principais ofertantes e *market share* no mercado mundial de aerogeradores

Tabela 3.12 – Capacidade de geração de energia eólica no Brasil por empresa

Tabela 3.13 – Capacidade instalada de usinas termoelétricas à biomassa, Brasil, 2011

Tabela 3.14 – Características econômicas de equipamentos para PCHs, por subsistema

Tabela 3.15 – Evolução prevista da capacidade instalada por fonte de geração, Brasil, 2010 e 2019

Tabela 3.16 – Estrutura da capacidade instalada da PCH, Brasil, 2011

Tabela 3.17- Síntese da competitividade da indústria de bens de capital para energia renovável, por fontes e subsistemas, Brasil

Capítulo 4

Figura 4.1 – Composição e distribuição do painel de respondentes do estudo nas diversas fontes investigadas

Figura 4.2 – Índice de respostas obtidas (total de respondentes/respostas)

Figura 4.3 – Composição dos respondentes no conjunto de respostas obtidas

Figura 4.4 – Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia solar

Figura 4.5 – Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia eólica

Figura 4.6 – Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia de biomassa

Figura 4.7 – Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia PCH

Tabela 4.1 – Tecnologias consideradas não relevantes na fonte de energia solar

Tabela 4.2 – Classificação das tecnologias relevantes prioritárias para a fonte de energia solar, segundo subsistema

Tabela 4.3 – Classificação das tecnologias relevantes críticas para a fonte de energia solar, segundo subsistema

Tabela 4.4 – Tecnologias consideradas não relevantes na fonte de energia eólica

Tabela 4.5 – Classificação das tecnologias relevantes prioritárias para a fonte de energia eólica, segundo subsistema

Tabela 4.6 – Classificação das tecnologias relevantes críticas para a fonte de tecnologia eólica, segundo subsistema

Tabela 4.7 – Tecnologias consideradas não relevantes na fonte de energia de biomassa

Tabela 4.8 – Classificação das tecnologias relevantes prioritárias para a fonte de energia biomassa, segundo subsistema

Tabela 4.9 – Classificação das tecnologias relevantes e críticas para a fonte de energia biomassa, segundo subsistema

Tabela 4.10 – Tecnologias consideradas não relevantes na fonte de energia PCH

Tabela 4.11 – Classificação das tecnologias relevantes prioritárias para PCH, segundo subsistema

Tabela 4.12 – Classificação das tecnologias relevantes críticas para PCH, segundo subsistema

Capítulo 5

Tabela 5.1 – Características dos modelos de negócio selecionados aplicados à energia fotovoltaica

Tabela 5.2 – Modelos de negócio selecionados aplicados à energia fotovoltaica e os impactos na indústria de bens de capital brasileira

Tabela 5.3 – Características dos modelos de negócio selecionados aplicados à energia eólica

Tabela 5.4 – Modelos de negócio selecionados aplicados à energia eólica e impactos na indústria de bens de capital brasileira

Tabela 5.5 – Características dos modelos de negócio selecionados aplicados à biomassa

Tabela 5.6 – Modelos de negócio selecionados aplicados à biomassa e os impactos na indústria de bens de capital brasileira

Tabela 5.7 – Características dos modelos de negócio selecionados aplicados às PCHs

Tabela 5.8 – Modelos de negócio selecionados aplicados às PCHs e os impactos na indústria de bens de capital brasileira

Tabela 5.9 – Síntese do impacto do potencial de demanda na indústria de bens de capital por fontes de energia renováveis

Capítulo 6

Tabela 6.1 – Faixas de custo médio do MW/h gerado, segundo fontes, 2011

Anexo I – Listas de Tecnologias

[sem figuras]

Anexo II – Relatório da pesquisa de campo

Figura AII.1 – Composição e distribuição do painel de respondentes do estudo nas diversas fontes investigadas

Figura AII.2 – Processamento dos resultados da pesquisa de campo

Figura AII.3 – Índice de respostas obtidas (total de respondentes/respostas)

Figura AII.4 – Participação de respondentes do "meio acadêmico" e do "meio industrial" nas respostas obtidas

Figura AII.5 – Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia eólica

Figura AII.6 – Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia solar

Figura AII.7 – Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia de biomassa

Figura AII.8 – Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia PCH

Tabela AII.1 – Modelo de "cabeçalho" do questionário

Tabela AII.2 – Classificação das tecnologias analisadas para a fonte de tecnologia eólica em relevantes prioritárias e críticas, conforme os resultados da pesquisa de campo

Tabela AII.3 – Classificação das demais tecnologias ligadas à fonte de energia eólica

Tabela AII.4 – Classificação das tecnologias analisadas para a fonte de energia solar em relevantes prioritárias e críticas, conforme os resultados da pesquisa de campo

Tabela AII.5 – Classificação das demais tecnologias ligadas à fonte de energia solar

Tabela AII.6 – Classificação das tecnologias analisadas para a fonte de energia de biomassa em relevantes prioritárias e críticas, conforme os resultados da pesquisa de campo

Tabela AII.7 – Classificação das demais tecnologias ligadas à fonte de energia de biomassa

Tabela AII.8 – Classificação das tecnologias analisadas para a fonte de energia PCH em relevantes prioritárias e críticas, conforme os resultados da pesquisa de campo

Tabela AII.9 – Classificação das demais tecnologias ligadas à fonte de energia PCH

Anexo III – Tabelas de síntese da pesquisa de campo

Tabela AIII.1 – Questões e possibilidades de respostas

Tabela AIII.2 – Questões e possibilidades de respostas (com IDs) e forma de apresentação no banco de dados

Anexo IV – Empresas da IBKER segundo áreas e máquinas específicas, 2011

Tabela AIV.1 – Empresas da IBKER segundo áreas e máquinas específicas, 2011

Anexo V – Medidas para a promoção da IBKER no Brasil: Tabelas de referência e síntese

Tabela AV.1 – Medidas para a promoção da IBKER – condicionantes iniciais

Tabela AV.2 – Recomendações de medidas para a promoção da IBKER – fonte eólica

Tabela AV.3 – Condicionantes para a promoção do segmento solar fotovoltaico

Tabela AV.4 – Recomendações de medidas para a promoção da IBKER – solar fotovoltaico

Tabela AV.5 – Condicionantes para a promoção do segmento de biomassa

Tabela AV.6 – Recomendações de medidas para a promoção da IBKER – biomassa

Tabela AV.7 – Condicionantes para a promoção do segmento PCH

Tabela AV.8 – Recomendações de medidas para a promoção da IBKER – PCH

Sumário

1. Introdução, 1
1.1. Metodologia da pesquisa, 3
1.2. Estrutura do relatório, 12
2. Cadeias produtivas e segmentação tecnológica na IBKER, 13
2.1. Energia solar, 14
2.1.1 Energia solar fotovoltaica, 14
2.1.2. Energia solar térmica, 26
2.2. Energia eólica, 37
2.3. Energias tradicionais, 49
2.3.1. Geração de eletricidade a partir da biomassa, 49
2.3.2. Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH), 64
3. Estrutura da oferta da indústria de bens de capital para energia renovável, 73
Introdução, 74
3.1. Equipamentos para energia solar fotovoltaica, 75
3.1.1. Características econômicas, 75
3.1.2. Estrutura da oferta mundial, 81
3.1.3. Estrutura da oferta no Brasil, 85
3.2. Equipamentos para energia eólica, 88
3.2.1. Características e tendências, 89
3.2.2. Estrutura da oferta mundial, 91
3.2.3. Estrutura da oferta no Brasil, 96
3.3. Equipamentos para energias renováveis “tradicionais”, 100
3.3.1. Biomassa, 101
3.3.2. PCHs, 108
3.4. Conclusões, 115

4. Tecnologias emergentes e resultados da pesquisa de campo, 119

4.1. Taxas de respostas, 120

4.2. Resultados em energia solar, 122

4.3. Resultados para energia eólica, 128

4.4. Resultados em energia de biomassa, 133

4.5. Resultados em energia PCH, 137

5. Energia renovável e os impactos sobre a IBKER no Brasil, 143

Introdução, 144

5.1. Modelos de negócio de energia solar fotovoltaica e os impactos na indústria de bens de capital, 147

5.2. Modelos de negócio de energia eólica e os impactos sobre a indústria de bens de capital, 151

5.3. Modelos de negócio de energias renováveis "tradicionais" e os impactos na indústria de capital, 152

5.3.1. Modelos de negócio aplicados à biomassa e os impactos na indústria de bens de capital, 152

5.3.2. Modelos de negócio aplicados a PCHs e os impactos na indústria de bens de capital, 158

5.4. Conclusões, 162

6. Políticas públicas e desenvolvimento da Indústria Brasileira de Bens de Capital para Energias Renováveis, 165

Introdução, 167

6.1. Políticas públicas e bens de capital para energia solar fotovoltaica, 172

6.2. Políticas públicas e bens de capital para energia eólica, 177

6.3. Políticas públicas e bens de capital para biomassa, 182

6.4. Políticas públicas e bens de capital para PCHs, 190

6.5. Considerações finais, 193

Anexo I - Listas de Tecnologias, 195

Apresentação, 196

A - Lista de tecnologias para a energia eólica, 196

B - Lista de tecnologias para a energia solar, 198

C - Lista de tecnologias para a biomassa, 201

D - Lista de tecnologias para PCH, 203

Anexo II - Relatório da pesquisa de campo, 207

Apresentação, 208

1 - Procedimentos metodológicos da pesquisa de campo, 208

2 - Resultados da pesquisa de campo, 213

A - Energia eólica, 216

B - Energia solar, 219

C - Energia biomassa, 222

D - Energia PCH, 225

Anexo III - Tabelas de síntese da pesquisa de campo, 229

Introdução, 230

1 - Banco de dados gerado no estudo, 231

2 - Tabelas de síntese dos resultados da pesquisa de campo, 233

Anexo IV - Empresas da IBKER segundo áreas e máquinas específicas, 2011, 235

Anexo V - Medidas para a promoção da IBKER no Brasil – Quadros de referência e síntese, 239

Referências Bibliográficas, 249

1. Introdução

No Brasil, embora a matriz energética seja reconhecidamente limpa, dada a preponderância de geração de energia hidráulica, a ampliação da oferta de energia para sustentar o crescimento econômico demanda investimentos elevados, de longo prazo, em hidrelétricas cada vez mais distantes dos centros de consumo, com forte impacto ambiental. A relevância da diversificação da matriz energética brasileira se faz necessária buscando alternativas para aumentar a segurança no abastecimento de energia elétrica, além de permitir a valorização das características e as potencialidades regionais e locais.

Um dos grandes desafios para o futuro da humanidade é o da geração de energia. Governos, iniciativa privada, pesquisadores e ambientalistas do mundo inteiro discutem maneiras de ampliar a oferta de energia de forma eficiente e sustentável para acompanhar o crescimento econômico.

Em um relatório recente do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), *Tendências Globais de Investimentos em Energias Sustentáveis 2009* (*Global Trends in Sustainable Energy Investment*), o Brasil foi considerado campeão mundial no uso de energias renováveis, visto que 46% de toda a energia consumida no país são provenientes de fontes limpas, destacando-se a hidroeletricidade e os biocombustíveis.

A política energética atual do Brasil, além de prever investimentos para a construção de novas hidrelétricas, busca diversificar a matriz energética incluindo energia nuclear, eólica, fotovoltaica, solar e biomassas. Nessa perspectiva, são grandes os desafios e as oportunidades para a indústria brasileira de bens de capital.

Resultado da articulação oriunda entre governo e representantes do setor privado,[1] a agenda de ações da Política de Desenvolvimento Produtivo (PDP) para o setor de bens de capital (BK), apesar das várias medidas já implementadas (na maioria voltada para a desoneração tributária e incentivos fiscais), carece de medidas voltadas para a competitividade com um foco na inovação tecnológica.

Com o objetivo de complementar a Agenda da PDP com medidas e metas de caráter tecnológico, a ABDI, ABIMAQ e o Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio (MDIC) reuniram-se em São Paulo

1. Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ) e Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE).

em meados de 2009 para debaterem as oportunidades de desenvolvimento de ações conjuntas para o setor, tendo como referência inicial as experiências da ABDI no desenvolvimento dos Estudos Prospectivos (EPS) e Agendas Tecnológicas Setoriais (ATS).[2] Entre as ações planejadas, estava o desenvolvimento de uma ATS com foco em energias renováveis.

Para a construção dessa ATS com foco em energias renováveis, fazia-se necessário, entretanto, conhecer e avaliar as perspectivas de desenvolvimento tecnológico para a IBKER no curto, médio e longo prazos, de forma a orientar a definição de medidas e instrumentos para promover o aumento da competitividade do setor. Com esse objetivo, propôs-se o projeto de pesquisa "Avaliação das Perspectivas de Desenvolvimento Tecnológico para a Indústria de Bens de Capital para Energia Renovável" (PDTS-IBKER).

Coordenado pelo Grupo de Indústria e Competitividade do Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (GIC/IE-UFRJ), com o apoio administrativo da Fundação Universitária José Bonifácio e financiamento da ABDI, o projeto PDTS-IBKER teve como objetivo principal realizar uma avaliação das perspectivas de desenvolvimento tecnológico para a Indústria de Bens de Capital para Energia Renovável, esperadas para o horizonte dos próximos 15 anos, para subsidiar iniciativas posteriores da ABDI visando construir uma agenda tecnológica para essa indústria. Tendo em vista a complexidade da IBKER, decorrente do elevado número de componentes e etapas de processos produtivos envolvidos na fabricação desses bens, foi selecionado para análise o conjunto de equipamentos relacionados à geração e à transmissão de energia elétrica originada das seguintes fontes renováveis:

- Eólica;
- Solar e fotovoltaica; e
- Tradicionais: biomassa e hidráulica (PCH).

1.1. Metodologia da pesquisa

A metodologia utilizada no projeto PDTS-IBKER levou em conta a coleta de dados bibliográficos em bases de dados, livros, periódicos e publicações técnicas, além de dados empíricos obtidos por meio de uma pesquisa de campo e de entrevistas em empresas.[3] As atividades do projeto se organizaram e desenvolveram em três fases: preparação dos estudos,

2. A partir dessa iniciativa, foram realizadas diversas reuniões técnicas de articulação e mobilização entre a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI), ABIMAQ, IPDMAQ, ABINEE e IPD Elétron, que resultaram no Acordo de Cooperação nº 005/2010 assinado entre esses partícipes.

3. A metodologia da pesquisa de campo é descrita brevemente neste capítulo introdutório e, em detalhes, no Anexo I. Os resultados do campo são reportados no Capítulo 4 e detalhados no Anexo I. Além da pesquisa de campo, realizaram-se entrevistas em empresas do setor.

pesquisa de campo, análise das informações e redação de documentos – conforme descrição a seguir.

Fase 1 – Preparação dos estudos

Os estudos de prospecção tecnológica têm maiores chances de sucesso quando conseguem envolver especialistas que colaboram com suas visões e experiências como representantes de indústrias, associações empresariais e profissionais, centros de pesquisa e formuladores de políticas. Logo, o projeto PDTS-IBKER contou, na fase de preparação do estudo, com um comitê técnico,[4] formado com as atribuições principais de identificar as tecnologias emergentes na indústria de IBKER e indicar respondentes para participar da pesquisa de campo.

4. A formação de um comitê técnico baseou-se na premissa de que a realização dos estudos de prospecção tecnológica terá maiores chances de sucesso se conseguir envolver especialistas que colaboram com suas visões pessoais sobre as tecnologias emergentes e não como representantes de empresas, associações ou órgão de classe.

O comitê técnico foi formado por sete especialistas com o perfil anteriormente descrito, mesclando visões tanto do lado da indústria produtora dos bens de capital quanto do lado dos produtores de energia e usuários desses equipamentos nas classes selecionadas para o estudo (eólica, biomassas, solar e hidráulica). Sua composição foi a seguinte:

Tabela 1.1 - Membros do comitê técnico

Especialista	Instituição	Fonte de energia
Electo Eduardo Silva Lora	NEST/UNIFEI	Biomassa
José Tadeu Matheus	Wobben	Eólica
Ricardo Marques Dutra	DTE/CRESESB/CEPEL	Eólica
Geraldo Lucio Tiago Filho	CERPCH/UNIFEI	PCH
Ernani Felippe Beppler	ex-Voith Siemens	PCH
Izete Zanesco	NT Solar / PUC-RS	Solar
Arno Krenzinger	LES/UFRGS	Solar
Silvio Carlos Anibal de Almeida	Escola Politécnica da UFRJ	Biomassa

Na fase de preparação da pesquisa, o comitê técnico foi reunido durante a Oficina de Trabalho Inaugural, com o objetivo de discutir com as especificidades da pesquisa e estabelecer os critérios para a identificação e a seleção das tecnologias emergentes para a IBKER. Essa oficina foi realizada em 18/04/2011 nas dependências do COBEI, em São Paulo/SP.

A partir dos critérios estabelecidos na oficina,[5] os especialistas do comitê técnico elaboraram quatro listas de tecnologias (uma para cada fonte de energia estudada). Essas listas foram apresentadas, discutidas e validadas durante a 2ª Oficina de Trabalho, realizada em 20/06/2011 nas dependências da ABINEE, em São Paulo/SP. Na ocasião, a coordenação do projeto e demais participantes sugeriram alterações e melhoramentos nas listas, cabendo aos especialistas do comitê técnico implementar as sugestões e reenviar as listas para a coordenação do projeto. Também durante a 2ª Oficina de Trabalho, estabeleceram-se as diretrizes para a elaboração das listas de respondentes a integrar o painel da pesquisa de campo.

5. Quais sejam: tecnologias relacionadas à produção na IBKER e tecnologias relacionadas especificamente aos bens de capital para energias renováveis, em estágios de comercialização, pré-comercialização, desenvolvimento e pesquisa.

Fase 2 – Pesquisa de campo

Com base na lista de tecnologias sugeridas pelo comitê técnico na Fase 1 do projeto, a coordenação desenvolveu a regra de redação dos enunciados sobre as tecnologias a serem investigadas na pesquisa de campo, qual seja:

> *Uso de... (tecnologia emergente)... em... (segmento, componente, princípio, etapa da produção etc.)...visando... (propriedade, desempenho, aperfeiçoamento etc.)...*

Após a implementação da regra de redação, foram geradas quatro listas de tecnologias,[6] as quais passaram a integrar o questionário da pesquisa de campo.

6. As listas de tecnologias emergentes e a segmentação tecnológica das mesmas nas cadeias produtivas das fontes energéticas são partes integrantes do Produto 3 do projeto.

O questionário foi organizado da seguinte forma: as linhas descrevem as tecnologias emergentes listadas pelos membros do comitê técnico e são validadas nas oficinas. As colunas buscam captar as dimensões relevantes para identificar as perspectivas de mudanças tecnológicas, compreendendo as seis questões propostas acerca de cada tecnologia listada. As **Tabelas 1.2** e **1.3** apresentam o modelo de questionário e as possibilidades de resposta. O Anexo II deste relatório descreve a metodologia da pesquisa de campo em detalhes.

O questionário foi hospedado em uma área do site do projeto (www.ie.ufrj.br/ibker) e ficou disponível para os respondentes por meio de *login* e senha pessoal. No total, foram elaborados e disponibilizados quatro questionários, um para cada fonte de energia.

Tabela 1.2 - Modelo de "cabeçalho" do questionário

Tecnologias emergentes	Conhecimento do respondente sobre o tópico	Factibili-dade	Viabilidade do uso comercial no mundo até 2025	Difusão esperada do tópico no Brasil		Potencial para produção no Brasil
Descrição: Tecnolo-gia: uso (campo de aplicação), características				Em cinco anos	Em 15 anos	
1...	Não conhece Conhece superficialmente Conhece evoluções recentes Monitora pesquisas Realiza pesquisas	Factível Não factível	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta
...	–		–	–	–	–
n...	Não conhece Conhece superficialmente Conhece evoluções recentes Monitora pesquisas Realiza pesquisas		Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta

Tabela 1.3 – Questões e possibilidades de respostas

Questões	Possibilidades de respostas
Conhecimento do respondente sobre o tópico/tecnologia	Não conhece Conhece superficialmente Conhece evoluções recentes Monitora pesquisas realizadas Realiza pesquisa
Factibilidade técnica	Factível Não factível
Viabilidade do uso comercial no mundo até 2025	Nula ou baixa Média Alta
Difusão esperada da tecnologia no Brasil em 5 anos	Nula ou baixa Média Alta
Difusão esperada da tecnologia no Brasil em 15 anos	Nula ou baixa Média Alta
Potencial para a produção no Brasil até 2025	Nula ou baixa Média Alta

Nessa fase, o questionário foi aplicado a um painel de respondentes formado por especialistas indicados pelos membros do comitê técnico. Adicionalmente às indicações do comitê, a coordenação do estudo realizou um levantamento de representantes da indústria de bens de capital para energia, bem como de núcleos de pesquisa e acadêmicos, com o intuito de montar uma amostra representativa da indústria de bens de capital para energia, de seus fornecedores, clientes e acadêmicos que desenvolvem pesquisas sobre o tema. Esse painel de respondentes especialistas foi convidado a participar da pesquisa de campo do projeto, através do envio de uma carta-convite especifica. O painel subdividiu-se em quatro grupos de respondentes, um para cada fonte de energia, que opinaram em relação às tecnologias investigadas para a IBKER nas diferentes fontes.[7]

7. Um mesmo especialista tinha a opção de opinar sobre mais de uma fonte de energia. Nesse caso, esse especialista responderia mais de um questionário.

A aplicação dos questionários da pesquisa de campo do projeto proporcionou a elaboração de um banco de dados em Excel, composto de dez colunas e 8.779 (oito mil setecentos e setenta e nove) linhas, com o intuito de facilitar o acesso às informações agregadas obtidas na pesquisa.

Fase 3 – Análise das informações e redação de documentos

A partir do banco de dados gerado com os resultados da pesquisa de campo, elaborou-se um conjunto de quatro tabelas (uma para cada fonte de energia), que sistematizam as respostas obtidas durante a pesquisa de campo,[8] ou seja, a avaliação do painel de respondestes para cada uma das tecnologias emergentes investigadas. Posteriormente, os resultados obtidos na pesquisa de campo foram processados de acordo com a metodologia descrita na **Figura 1.1**. Este procedimento permitiu identificar as tecnologias relevantes para a IBKER nas diferentes fontes de energia. Os conceitos adotados são resumidos abaixo:

8. Também apresentadas de forma detalhada no Anexo II.

- **Tecnologias emergentes:** novos produtos, novos usos de produtos já existentes, novos processos produtivos ou novos materiais e componentes em fase pré-comercial, de desenvolvimento ou pesquisa exploratória em um horizonte de 15 anos.

- **Tecnologia não factível:** são tecnologias irrealizáveis, por demandarem desenvolvimentos futuros de novos materiais e/ou de novos componentes e/ou de novos processos etc. Assume-se que essas tecnologias não podem ser produzidas diante do atual estado das artes e da perspectiva do mesmo para os próximos 15 anos.
- **Tecnologia factível:** são tecnologias emergentes viáveis de serem produzidas diante do atual estado das artes.
- **Tecnologia não viável:** são tecnologias inviáveis diante de uma análise de custo e benefício em um horizonte de 15 anos, seja diante de outras tecnologias concorrentes ou pelas características da própria da tecnologia emergente analisada.
- **Tecnologia viável:** são tecnologias emergentes que possuem um resultado favorável diante de uma análise de custo e benefício em relação às suas próprias características ou diante de outras tecnologias.
- **Tecnologia relevante:** são aquelas que terão um rápido/alto grau de difusão no Brasil nos próximos 15 anos.
- **Tecnologia relevante crítica:** são as tecnologias relevantes em que se identifica que o país possui um baixo potencial de produção até 2025, demandando que, tanto a IBKER quanto as agências de fomento e desenvolvimento busquem soluções que permitam o desenvolvimento e a produção dessas tecnologias no Brasil.
- **Tecnologia relevante prioritária:** são tecnologias emergentes com alto potencial de produção no Brasil em um horizonte de 15 anos, no sentido de que a IBKER deve direcionar seus esforços para a consolidação e o desenvolvimento de suas capacitações nessas tecnologias.

Percebe-se, com base no fluxograma, que o primeiro filtro aplicado busca identificar a factibilidade da tecnologia[9] emergente analisada, logo, assume-se o critério de que a tecnologia em questão é factível quando, no mínimo, 70% dos especialistas entrevistados a consideram assim, caso contrário a tecnologia é considerada não factível e "descartada" da análise. Posteriormente, o requisito analisado relaciona-se à viabilidade do uso comercial[10] no mundo da tecnologia analisada e neste caso, a tecnologia é considerada viável caso 70% dos especialistas tenham esta opinião, em

9. Por factibilidade técnica, entende-se a real possibilidade do desenvolvimento e do uso dos métodos de produção, e dos materiais (componentes) de uma determinada tecnologia.

10. A viabilidade comercial refere-se à análise da relação entre custo e benefício da tecnologia investigada.

contrapartida, se a tecnologia analisada não atender a esse requisito, ela será considerada não viável e descartada da análise. Por fim, uma última análise no sentido de considerar a tecnologia relevante ou não investiga a percepção dos especialistas respondentes sobre a velocidade de difusão esperada da nova tecnologia no Brasil, neste caso, quando mais de 70% dos especialistas consideram que a tecnologia será difundida em média/alta escala nos próximos cinco anos e em alta escala nos próximos 15, a tecnologia é considerada relevante, caso contrário, a tecnologia é considerada não atrativa e descartada da análise.

Portanto, as tecnologias emergentes analisadas que atendem aos critérios metodológicos assumidos na pesquisa de campo são consideradas tecnologias relevantes, no sentido de que devem ter especial atenção da IBKER, apontando as tendências futuras em termos de produção e tecnologia do produto. Adicionalmente, adota-se um critério que busca medir a potencialidade de produção da tecnologia relevante identificada no Brasil até 2025. Neste sentido, se mais de 50% dos especialistas acreditam que a tecnologia tem um alto potencial de produção no Brasil, ela é considerada uma "tecnologia relevante prioritária", caso contrário, ela é considerada uma "tecnologia relevante crítica".

Com base nos procedimentos metodológicos adotados na pesquisa de campo e no processamento de resultados do mesmo, podemos identificar, para cada fonte de energia investigada, um conjunto de tecnologias emergentes que podem ser classificadas em dois grupos distintos: *tecnologias relevantes prioritárias* e *tecnologias relevantes críticas*. As tecnologias relevantes são as consideradas pelos especialistas respondentes de alta factibilidade, alta viabilidade e alta/rápida difusão esperada no Brasil. Em contrapartida, essas tecnologias relevantes podem ter um elevado potencial de produção no Brasil até 2025, o que as torna "relevantes prioritárias", no sentido de que a IBKER deve direcionar seus esforços para a consolidação e o desenvolvimento de suas capacitações nessas tecnologias. Se na opinião do painel de respondentes as tecnologias relevantes investigadas possuem baixo potencial de produção no Brasil até 2025, elas são consideradas "relevantes críticas", demandando que, tanto a IBKER quanto as agências de fomento e desenvolvimento busquem soluções que permitam o desenvolvimento e a produção dessas tecnologias no Brasil.

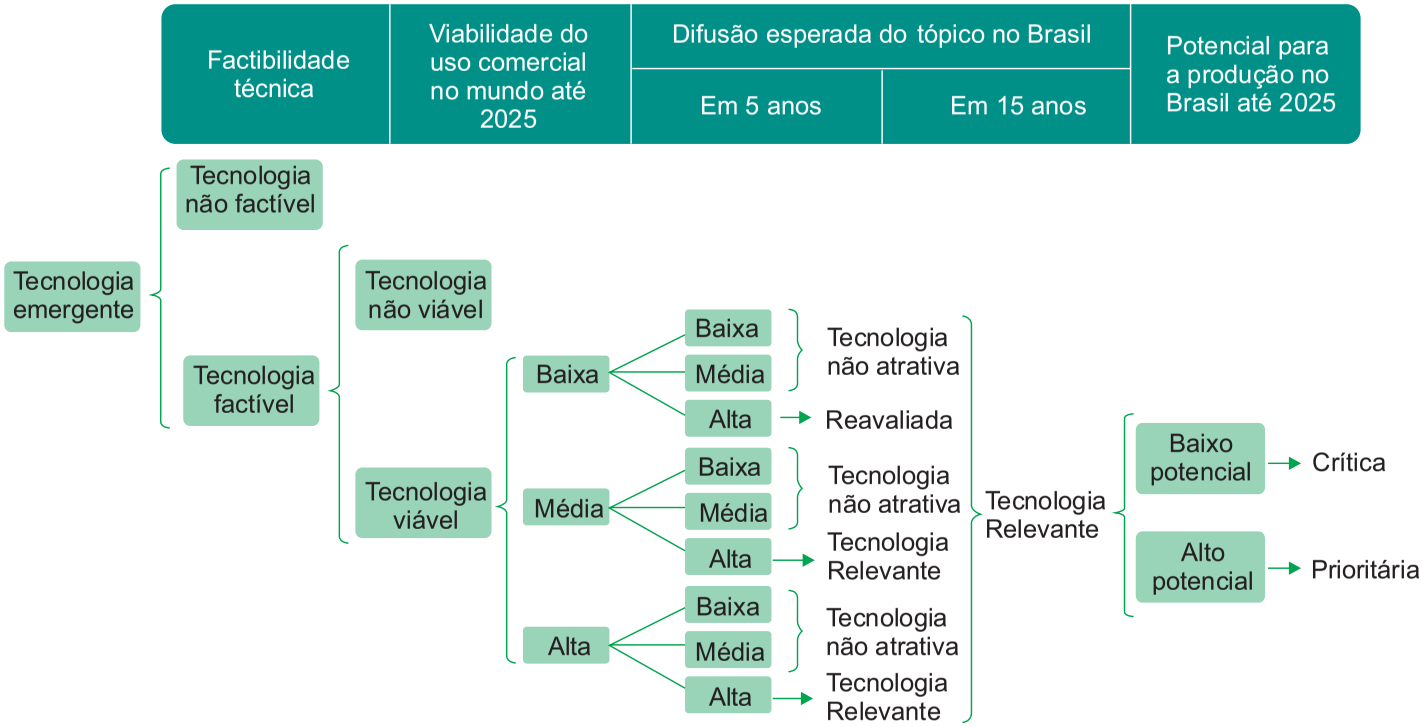


Figura 1.1
Processamento dos resultados da pesquisa de campo

Os resultados obtidos na pesquisa de campo nas diferentes fontes de energia foram submetidos a uma validação do comitê técnico na terceira Oficina de Trabalho. Além dos resultados obtidos pela pesquisa de campo e das informações obtidas com os especialistas participantes, foram utilizadas as seguintes fontes de informação para este projeto: o acervo bibliográfico levantado para este projeto, as bases estatísticas do IBGE, as associações empresariais, assim como o material conseguido nas empresas produtoras, fornecedoras, usuárias e centros de P&D envolvidos com a IBKER. Os resultados preliminares da pesquisa de campo foram apresentados no evento ABIMAQ Inova 2011, realizado nas dependências da associação em 08/11/2011, em São Paulo/SP.

1.2. Estrutura do relatório

Este relatório final está dividido em cinco capítulos além desta introdução. O Capitulo 2 identifica a estrutura da cadeia produtiva da IBKER desde os fornecedores de insumos até a oferta de equipamentos para a produção de energia renovável, investigando as características de controle da cadeia e da inovação nessa indústria. Adicionalmente, esse capítulo apresenta a segmentação tecnológica da IBKER. A estrutura da oferta mundial na IBKER é analisada no Capítulo 3, através dos elementos relacionados à concentração da produção, principais players, segmentação da oferta, evolução do faturamento, distribuição geográfica mundial da produção, entre outros tópicos correlatos. Ainda nesse capítulo, fatores relacionados à IBKER no Brasil são destacados, analisando a produção e o faturamento das empresas, características do mercado interno, participação no comércio internacional (exportações e importações), emprego e investimentos. O Capítulo 4 apresenta os resultados alcançados na pesquisa de campo, focando na abrangência e na avaliação das tecnologias emergentes investigadas nas quatro fontes de energia. A análise dos resultados da pesquisa de campo, de acordo com a segmentação da tecnologia e a análise do estágio de desenvolvimento tecnológico da IBKER no Brasil relativamente à fronteira nacional, é tratada no Capítulo 5. Por fim, o Capítulo 6 analisa a importância das políticas públicas para o desenvolvimento tecnológico da IBKER, com uma especial ênfase no debate sobre as vantagens de focar essas políticas nos produtores ou nos usuários.

2. Cadeias produtivas e segmentação tecnológica na IBKER

Uma cadeia produtiva pode ser vista como o conjunto de atividades técnico-econômicas desenvolvidas por empresas pertencentes a categorias definidas como segmentos homogêneos quanto à similaridade de suas funções produtivas, ou seja, pelos insumos, tecnologias e processos que utilizam para produzir um bem ou um serviço.

No caso da indústria de transformação, a cadeia produtiva de um determinado bem ou produto final é o encadeamento das diversas etapas de produção que propiciam a transformação de matérias-primas e insumos em bens e serviços finais para a colocação no mercado. Nessa transformação, os setores produtores constituintes da cadeia produtiva de determinado produto utilizam tecnologias e processos similares e/ou complementares.

2.1. Energia solar

2.1.1. Energia solar fotovoltaica

Cadeia produtiva

A cadeia produtiva de energia elétrica a partir de células fotovoltaicas é composta de seis grandes segmentos: empresas de consultoria em sistemas solares, empresas do setor de purificação de silício, empresas produtoras de materiais semicondutores fotovoltaicos (células e módulos), empresas (produtoras e representantes) de painéis fotovoltaicos; empresas de equipamentos auxiliares e material elétrico e eletrônico (baterias, acumuladores, sensores, inversores, controladores de carga); e empresas especializadas em serviços de instalação e manutenção.

No segmento de empresas produtoras de máquinas e equipamentos, enquadram-se as empresas que desenvolvem máquinas e equipamentos para a fabricação de células solares, módulos fotovoltaicos, purificação de silício e crescimento de lingotes de silício. Também há empresas de engenharia que fornecem fábricas prontas (*turnkey*) para a produção de cada um dos produtos acima mencionados. As principais empresas deste setor estão localizadas na Europa, Estados Unidos e Japão.

As empresas fornecedoras de materiais e insumos para toda a cadeia produtiva, desde a purificação de silício e outros materiais até o sistema fotovoltaico, são dos setores de química, metalurgia, polímeros, vidros, eletroeletrônico, entre outros. Além da matéria-prima semicondutora para a fabricação de células solares, são necessários produtos químicos, gases e substratos específicos para cada tecnologia. Para a produção dos módulos fotovoltaicos, são necessários, além das células, vidros, polímeros, silicone, alumínio e componentes eletroeletrônicos. Para a produção de baterias, são envolvidos os setores de química, metalurgia, indústria mecânica e polímeros. As outras partes dos sistemas fotovoltaicos envolvem mais especificamente o setor elétrico e eletrônico de controle e de potência, que utilizam basicamente componentes eletrônicos na sua fabricação.

As empresas do setor de purificação de silício demandam elevados investimentos para sua implantação. Nesse setor, há empresas que comercializam somente o silício purificado e outras que, além da purificação, produzem o lingote e as lâminas de silício, tanto de silício monocristalino quanto multicristalino, com diferentes técnicas para a obtenção do lingote. Também há empresas de purificação de outros materiais e compostos semicondutores. As empresas desse setor são as que apresentam maior quantidade de resíduos químicos, os quais devem ser tratados.

A maior parte das empresas do setor de produção de células solares e módulos fotovoltaicos está na Ásia. A tecnologia do silício domina o mercado. Poucas empresas são verticalizadas, isto é, produzem a matéria-prima e os produtos desde a purificação do silício até a instalação dos módulos fotovoltaicos. Nesse setor, enquadram-se as diferentes tecnologias de fabricação de células solares e módulos fotovoltaicos.

As empresas de equipamentos e materiais para a instalação de sistemas (BOS) são do setor eletrônico, elétrico, mecânico, metalúrgico e de engenharia tais como as empresas que desenvolvem e/ou comercializam inversores, controladores de carga, baterias etc.

No Brasil, ainda não há um mercado estabelecido para os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, consequentemente não há empresas especializadas nos serviços de instalação desses sistemas e as empresas de distribuição de energia elétrica deverão adaptar-se em um futuro próximo, contemplando a energia solar fotovoltaica.

Considerando que o foco central deste trabalho é a cadeia produtiva de bens de capital para a produção de energia elétrica a partir da energia solar, que a tecnologia do silício domina o mercado e que o mercado em expansão é de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, o núcleo dessa cadeia está focado na purificação do silício, fabricação de células solares, módulos fotovoltaicos e inversores. Esses produtos são os componentes básicos de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

A cadeia produtiva para os sistemas heliotérmicos de produção de eletricidade envolve uma quantidade muito grande de insumos, sendo que muitos deles já têm uma produção estabelecida no Brasil. É relativamente fácil dividir uma usina solar heliotérmica em duas partes: uma contendo os equipamentos responsáveis pelo aquecimento do fluido nos concentradores e trocadores de calor para o armazenamento térmico (que poderíamos chamar de parte solar da usina) e outra que corresponde à geração de vapor, conversão em energia mecânica na turbina e conversão em energia elétrica nos geradores (que poderíamos chamar de parte termoelétrica).

A parte termoelétrica tem exatamente os mesmos componentes de uma usina termoelétrica que queima combustíveis, com exceção da caldeira e, neste sentido, todo e qualquer bem de capital utilizado em uma termoelétrica convencional também entraria na cadeia produtiva desta parte da usina. Por esta razão, faz mais sentido elencar os componentes correspondentes apenas para a parte solar da usina.

Os materiais e os produtos necessários para a montagem e a utilização da parte solar das usinas termoelétricas envolvem as empresas produtoras de espelhos, tubos absorvedores, fluidos térmicos e servomecanismos de precisão.

As empresas produtoras de vidros e espelhos de qualidade poderiam produzir espelhos de diferentes dimensões, com curvaturas específicas segundo o projeto, com durabilidade quando expostos à intempérie. O Brasil tem uma bem desenvolvida indústria de vidros, mas teria que se adequar às necessidades especiais desses projetos.

Empresas produtoras de tubos absorvedores para energia solar não existem no Brasil. Há poucas empresas estabelecidas em todo o

mundo, geralmente também associadas a empresas de vidros, uma vez que esses absorvedores também utilizam um tubo de vidro externo com vácuo entre o absorvedor e a cobertura. Como qualquer indústria, a fabricação desses produtos dependeria da demanda, já que os tubos não têm aplicações em outros mercados.

As empresas produtoras de fluidos térmicos para alta temperatura, por sua vez, teriam mercado para esses produtos em outras termoelétricas. Trata-se de fluidos para temperaturas em torno ou acima de 300°C. Atualmente, nos absorvedores se utilizam óleos minerais para alta temperatura (300°C), concorrendo com óleos sintéticos (350°C) e óleos de silicone (400°C), sendo que está em estudo o uso de sais fundidos (400-500°C). No armazenamento de calor sensível, já são utilizados sais fundidos (nitratos e carbonatos) em grande volume (30 mil toneladas em uma usina), marcando a importância da indústria química neste segmento.

A indústria de mecânica de precisão e de servomecanismos poderia adaptar-se para produzir estruturas com acompanhamento do movimento aparente do Sol e direcionamento dos espelhos, com controles eletrônicos de direcionamento.

Pode-se concluir que há vários componentes da cadeia produtiva de usinas solares heliotérmicas que não são produzidos no Brasil, especialmente aqueles que se referem à parte "solar" do sistema. Pesquisas em materiais para armazenamento e fluidos térmicos, ótica de coletores concentradores e equipamentos de seguimento solar serão sempre bem-vindas para suportar este desenvolvimento. Vários setores industriais brasileiros poderiam adaptar-se para participar dessa cadeia produtiva de produtos específicos, sendo que alguns componentes mais sofisticados demandariam pesquisa ou aquisição de *know-how* para sua produção no país.

Tecnologia dos sistemas fotovoltaicos

Um sistema fotovoltaico produz energia elétrica a partir da radiação solar captadas por células fotovoltaicas constituídas de materiais semicondutores. Considerando que as tecnologias e os processos de produção de energia, junto com os materiais e os equipamentos utilizados, são o foco central desse trabalho, o núcleo da cadeia está na produção industrial das

células e dos módulos fotovoltaicos, painéis fotovoltaicos e equipamentos elétricos e eletrônicos auxiliares para a transformação, armazenamento e controle da energia gerada. Uma instalação fotovoltaica completa é composta de painéis solares fotovoltaicos, sistema de regulação da potência dos painéis (controlador de carga), sistema de armazenamento de eletricidade (baterias), inversor ou conversor de corrente (contínua em alternada), sistema de *backup* (opcional), sistema de regulação do sistema de *backup* e sistema de ligação com a rede.

Um sistema fotovoltaico é um conjunto de equipamentos construídos e integrados para, basicamente, transformar a energia solar em energia elétrica, armazenar a energia gerada e fornecer ou utilizar a energia armazenada. Quanto ao projeto de funcionamento, esses sistemas podem ser ligados à rede de energia elétrica que transferem para a rede toda a energia produzida; isolados em locais sem acesso à rede de distribuição, com a energia sendo armazenada em baterias; e híbridos, que combinam duas ou mais formas de energia – eólica e hídrica – ou mesmo um gerador convencional a diesel ou biodiesel.

Quanto aos componentes, o sistema fotovoltaico ligado à rede é constituído pelos mesmos sistemas isolados acrescidos dos elementos que estabelecem a ligação entre o gerador fotovoltaico e a rede, sua estrutura de suporte e componentes elétricos complementares. A **Figura 2.1** a seguir representa um sistema fotovoltaico completo isolado e seus componentes.

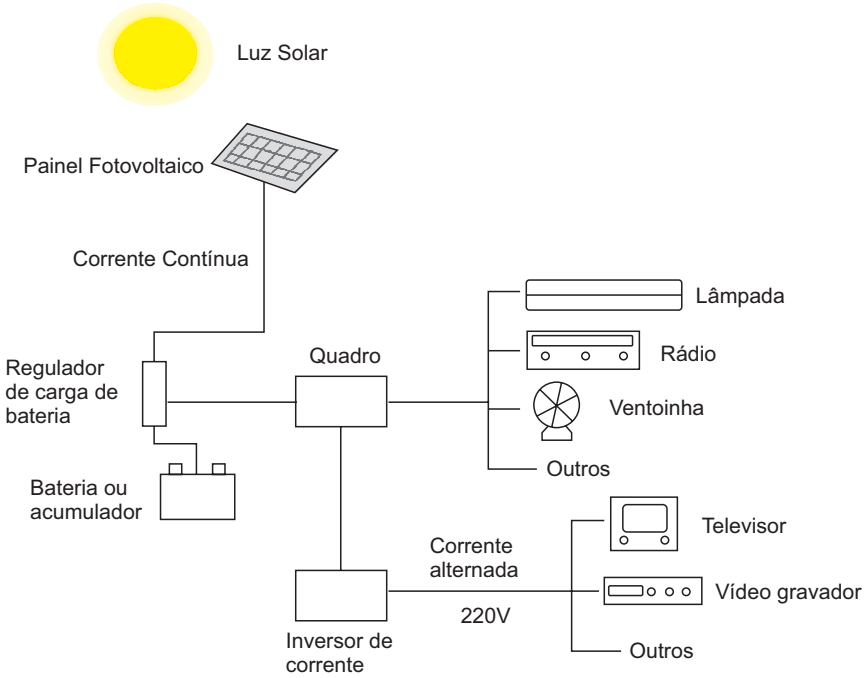


Figura 2.1
Componentes de um sistema fotovoltaico isolado

Fonte: Leva et al (2004).

Correlacionando esses componentes com os segmentos da cadeia produtiva utilizando a CNAE 2.0 do IBGE, desde os materiais processados até os produtos gerados dentro da indústria de transformação no Brasil, tem-se esquematicamente a **Tabela 2.1**.

Tabela 2.1 - Setores e produtos industriais da cadeia produtiva de energia solar fotovoltaica

Segmento	Setor industrial		Produto
Serviços de engenharia	Serviço de consultoria em engenharia	7112-0 – Serviços de engenharia	Projeto e instalação de painéis fotovoltaicos
Produção de materiais semicondutores	Fabricação de produtos de metal não especificados	2311-7 – Fabricação de produtos de vidro plano e de segurança 0729-4 – Extração de minério de cobre e outros materiais metálicos não ferrosos (terras raras)	Silício grau solar, células solares
Produção de peças e componentes	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	2511-6 – Fabricação de estruturas metálicas 2513-6 – Fabricação de obras em caldeiraria pesada. 2229-3/99 – Artefatos de material plástico para outros usos.	Módulos e painéis solares, peças e partes de painéis solares
Produção de máquinas e equipamentos elétricos e eletrônicos	Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	2710-4 – Geradores, transformadores e motores elétricos. 2721-0 – Pilhas, baterias e acumuladores elétricos. 2731-7 – Equipamentos para distribuição e controle de energia elétrica.	Geradores, transformadores, baterias, acumuladores, controladores de carga, inversores, conversores, seguidores de potência
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	Manutenção e reparação de máquinas e equipamentos elétricos	3321-0 – Instalação de máquinas e equipamentos industriais 3313-9/01 – Manutenção de geradores, transformadores e motores elétricos. 3313-9/02 – Manutenção e reparação de baterias e acumuladores elétricos.	Geradores, transformadores, motores, indutores, conversores, aparelhos e equipamentos de controle.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2.2 - Cadeia produtiva de energia solar fotovoltaica por segmentos da IBKER

Segmentos IBKER	Insumos e produtos industriais
Materiais e insumos	Silício grau solar, células solares e filme fino
Sistemas eletromecânicos	Gerador, transformador, motores, baterias
Sistemas eletroeletrônicos	Controlador de carga, inversor, conversor, seguidor de potência
Sistemas auxiliares e de controle	Aparelhos e equipamentos para controle de energia elétrica (painéis de controle)

Fonte: Elaboração própria.

Materiais e componentes

Silício solar é a matéria-prima básica mais utilizada atualmente para a composição das células fotovoltaicas. Os cristais de silício previamente purificados (99,9999% SGS) são transformados em lingotes, que são fatiados em pastilhas finas (> 200 mícrons) formando placas (*wafer*), que serão montadas em células usadas para a construção de módulos, que são a menor unidade dos painéis que formam o sistema, como mostra o esquema representado na **Figura 2.2**.

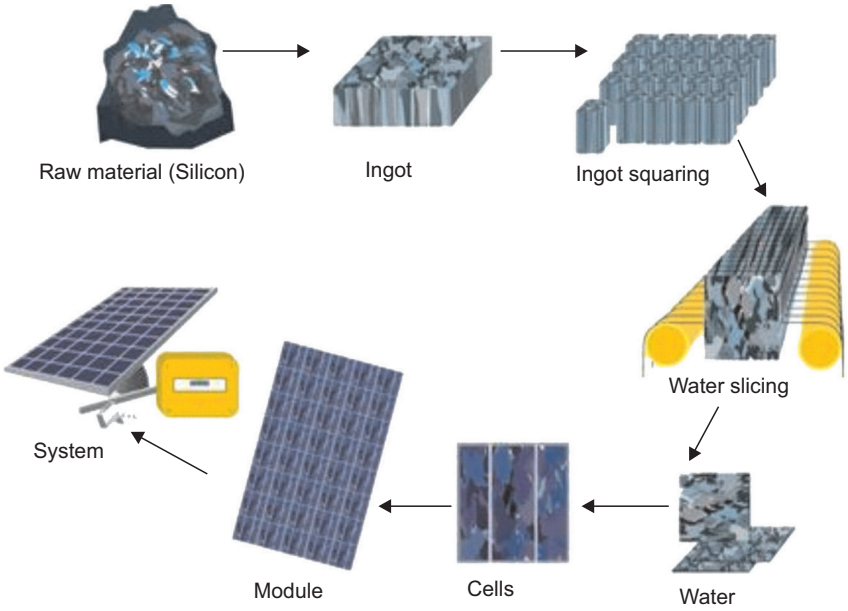


Figura 2.2
Materiais de um sistema solar fotovoltaico à base de silício

Fonte: http://www.epia.org/solar-pv/pv-technologies-cells-and-modules.html.

O silício puro não é bom condutor elétrico (não possui elétrons livres) assim, após a purificação, é necessário acrescentar "impurezas" que favoreçam o processo de obtenção de energia. Esse processo é conhecido como dopagem, podendo ser feito com a adição de cristais de fósforo – *dopagem n* – ou cristais de Boro – *dopagem p.* A dopagem é o processo que confere ao material semicondutor o efeito fotovoltaico, que permite a obtenção de energia.

As **células fotovoltaicas** são constituídas basicamente por uma fina camada de um material semicondutor, entre os quais o mais comum é o silício cristalino (Si), seguido do arsenieto de gálio (GaAs), sulfeto de cádmio (CdS) e sulfeto de cobre (Cu2S). Os semicondutores feitos de silício grau solar (SGS) são os mais usados por sua estabilidade e eficiência em converter luz solar em eletricidade, mas devido ao grau de pureza exigido 6N (99,9999%), o processo de fabricação é de alto custo. A rota tecnológica mais utilizada é a mesma rota da obtenção do SGE – silício grau eletrônico. Uma rota química via silício de grau metalúrgico (90%) vem sendo buscada para a redução dos custos tanto no Brasil e como no nível mundial.

Outros materiais semicondutores vêm sendo desenvolvidos e aprimorados na Europa e nos Estados Unidos para suceder ao silício, buscando maior eficiência e custos mais competitivos no mercado das energias renováveis. Entre esses, destacam-se os chamados filmes finos cujo rendimento ainda é inferior ao silício cristalino, mas reduz a espessura das placas na ordem de cem vezes, o que garante um importante decréscimo no custo. Entre os materiais mais utilizados nos filmes finos estão o silício amorfo hidrogenado, disselenato de cobre e índio, e telureto de cádmio. O processo utiliza menos matéria-prima e elimina a etapa de corte.

Porém, cada célula fotovoltaica fornece pouca energia elétrica (em torno de 0,4 volts), o que torna essencial o agrupamento das mesmas em módulos. O número de células em um módulo depende da tensão que se deseja gerar. Essas células podem ser conectadas em paralelo ou em série, dependendo também da tensão que se objetiva. A redução e a otimização das junções têm sido objeto de pesquisa nos sistemas atuais, pois são o ponto que resta para aproximar o sistema da sua eficiência teórica (30%).

Os **módulos fotovoltaicos** são a unidade básica do painel fotovoltaico núcleo de todo o sistema. Eles são compostos por células fotovoltaicas conectadas que geram tensão e corrente suficiente para a obtenção de uma energia efetiva. O número de células em um módulo depende da tensão que se deseja gerar. Essas células podem ser conectadas em paralelo ou em série, dependendo também da tensão que se objetiva.

Painéis. Os tipos de painéis atualmente comercializados são das chamadas primeira e segunda gerações, ou seja, os de silício cristalino e os de filmes finos que se distinguem quanto à tecnologia utilizada na confecção das células, como descrito a seguir:

- As células monocristalinas são as mais usadas, embora seu rendimento não seja superior a 25%; os rendimentos reais ainda se encontram na faixa de 16 a 17%. A indústria mundial já possui grande experiência na confecção dessas células, o que garante sua confiabilidade, embora ainda seja um processo complexo e de alto custo.
- As células policristalinas necessitam de menor processo de preparação da matéria-prima, o que reduz o custo de fabricação, mas com perda de cerca de 10% da eficiência energética.
- As células de filmes finos é a tecnologia mais nova no mercado (desde 2007). Baseia-se na deposição de finas camadas de material semicondutor em placas de vidro, processo que utiliza menos matéria-prima que os demais e elimina a etapa de corte. O rendimento ainda é inferior ao do silício cristalino, mas pesquisadores trabalham para reverter esse quadro.

Baterias. Os módulos fotovoltaicos são captores que se utilizam acumuladores e baterias para armazenar a energia produzida para o consumo. As mais comuns são as tradicionais baterias chumbo–ácido especialmente projetadas para essa função. Essas baterias são preferencialmente estacionárias, isto é, permitem variações de carga entre 20 e 80 por cento da capacidade máxima por várias vezes. Além disso, devem suportar ciclos profundos (quando o carregamento é deficitário em relação ao consumo por vários dias), para o caso de dias nublados ou estações pouco ensolaradas. Por fim, a taxa de autodescarga deve ser mínima, para evitar desperdícios.

Os controladores de carga objetivam otimizar a transferência de energia do painel para as baterias, evitando descargas ou recargas

excessivas que podem reduzir a vida útil destas. O bom funcionamento dos controladores de carga é fundamental nos sistemas isolados, pois uma eventual falha pode gerar danos irreversíveis às baterias. Por esse motivo, eles devem ser projetados de acordo com as especificações de tensão das baterias.

Inversor é o componente responsável por converter a corrente direta gerada pelo painel fotovoltaico em corrente alternada a ser utilizada. No caso dos sistemas interligados à rede elétrica, o inversor deve gerar uma tensão em sincronismo com a da rede. Existem dois tipos: conversores estáticos, que são habitualmente nomeados inversores e empregados nos sistemas fotovoltaicos, e conversores eletromecânicos, que são menos eficientes. Os conversores estáticos, ou inversores, utilizam sistemas de chaveamento para mudar a direção da corrente, fazendo a tensão variar de valores negativos a positivos. Essa variação é dependente do tipo de inversor em questão, que é classificado de acordo com a forma de onda da tensão de saída. Os principais tipos são: inversores de onda quadrada, inversores de onda retangular, inversores de onda senoidal e PWMs. As características de cada um desses tipos são variáveis e sua escolha deve ser dependente da finalidade do sistema.

Equipamentos auxiliares de controle

Conversores CC-CC. A utilização de conversores de corrente direta em corrente direta permite o exato controle de tensão e corrente aplicadas à bateria. A utilização de tensões e correntes específicas e controladas aumenta a vida útil da bateria, por isso os conversores CC-CC podem também ser usados como controladores de carga. Os conversores CC-CC também são utilizados quando se objetiva uma tensão final diferente da fornecida pela bateria. Contudo, quanto mais o conversor elevar a tensão, maior será o desperdício.

Seguidores do Ponto de Máxima Potência (MPPTs). Esses mecanismos controlam a tensão e a corrente de entrada, de modo que a potência dos módulos fotovoltaicos seja a máxima possível. O dimensionamento de sistemas com esse tipo de mecanismo é crítico, uma vez que a tensão e a corrente possuem variações consideráveis. Sendo assim, os MPPTs são utilizados em grandes projetos, quando os benefícios justificam o aumento dos custos.

Evolução e tendências tecnológicas

Mesmo sendo a mais nova das fontes alternativas de energia renovável, o uso do efeito fotovoltaico para gerar energia foi desenvolvido há cerca de 50 anos, sua evolução tecnológica tem sido bastante acelerada desde o final do século passado e já está entrando neste século em sua terceira geração. Desse modo, as células fotovoltaicas de silício cristalino da primeira geração, mesmo ainda detendo mais de 80% do mercado, devem sofrer uma substituição crescente pelas células de segunda geração, os filmes finos.

A segunda geração de células fotovoltaicas começou a ser desenvolvida nos anos 1970, baseada na tecnologia de deposição de filmes finos inicialmente utilizando silício amorfo hidrogenado, seguido de telureto de cádmio e compostos de cobre e índio. Esses últimos têm como maior problema sua alta toxicidade, que vem sendo contornada com a associação de material polimérico como uma cobertura, entre outras técnicas, que, além disso, confere maior eficiência a essas células. No uso comercial, apenas a partir de 2007 já detiveram em 2009 cerca de 18% do mercado mundial (EPIA Report, 2010). O grande potencial dessa nova tecnologia é seu reduzido custo em relação às células da primeira geração. As previsões são que ela domine o segmento de uso residencial nos próximos anos.[11]

11. http://www.top-alternative-energy-sources.com/solar-cells.html

A terceira geração, ainda em fase de pesquisa em laboratórios, deve representar uma ruptura total com as primeiras gerações não só pelo abandono do silício, como também por incluir novos materiais semicondutores especialmente desenvolvidos para eliminar a necessidade de junção das células nos painéis, aumentando significativamente a eficiência de todo o sistema fotovoltaico. Essa nova geração tem uma ampla gama de inovações radicais, tais como células poliméricas, células monocristalinas e células solares de Grätzel, as chamadas células "coloridas", que sintetizam a energia solar a partir da coloração em um processo análogo à fotossíntese.

Enfim, as tecnologias envolvidas nesse grupo são tão inovadoras quanto diversas e quando estiverem a ponto de ser comercializadas, devem ser separadas em diferentes categorias. Essa evolução, mesmo que distante, é factível, uma vez que o limite teórico do silício (33%) está

12. http://www.top-alternative-energy-sources.com/solar-cells.html

próximo de ser atingido e seu custo ainda continua elevado. Chegar próximo a esse limite mantendo o baixo custo alcançado pela segunda geração é o objetivo maior das pesquisas em andamento.[12]

O avanço contínuo das pesquisas na área da energia solar fotovoltaica aponta para uma terceira geração de células solares, incorporando melhoramentos para tornar mais viável as rotas atuais do silício e dos filmes finos em termos técnicos e econômicos, assim como novos caminhos para a obtenção de filmes finos. Para garantir essa viabilidade futura, alguns gargalos do processo produtivo devem ser superados, para que o custo final da energia gerada seja competitivo, prescindindo, dessa forma, de programas de subsídios governamentais sempre questionados nos momentos de crise.

A **Tabela 2.3** a seguir resume as perspectivas dos desenvolvimentos tecnológicos em andamento, agrupadas em quatro principais tendências identificadas na literatura europeia especializada, a saber: diversificação de materiais, melhoramento das células de silício cristalino, aumento do rendimento de módulos e painéis, reinvenção das células solares.

2.1.2. Energia solar térmica

Definições

Os sistemas de concentração de energia solar para a geração de energia térmica, ou Concentrating Solar Power (CSP), usam lentes e/ou espelhos associados a mecanismos de seguimento para focar grandes áreas de luz solar em pequenos feixes. Essa luz concentrada é depois utilizada como fonte de calor para as centrais térmicas convencionais ou, então, aplicada em superfícies fotovoltaicas (Pinto, 2010).

Os concentradores solares são equipamentos capazes de aquecer um fluido de trabalho a altas temperaturas, utilizando, para tal, a convergência dos raios solares incidentes na superfície terrestre. Essa energia calorífica é, então, transformada em energia mecânica pela utilização de turbinas ou outro equipamento e, posteriormente, em energia elétrica.

Tabela 2.3 - Perspectivas tecnológicas: novas tendências mundiais

Tendências	Tecnologias	Perspectivas
Diversificação de materiais	Compostos de cobre, selênio e índio ou gálio e alumínio (novos processos de produção via eletrólise), materiais orgânicos (polímeros condutores)	Novos processos mais rápidos, menos complexos com redução de material e custos
Aperfeiçoamento de células de silício cristalino	- Deposição do silício em grão em uma coluna vertical, onde são fundidos por um campo eletromagnético e cria-se um vórtice no escoamento que homogeneíza o silício. - Purificação com maçaricos de plasma; - Controle do processo de solidificação do silício, reduzindo em ¼ o tempo da passagem de estado	Redução de custos e aumento da eficiência energética dos sistemas atuais
Mescla do rendimento dos painéis	Aumento do número de junções; "heterojunção": deposição de uma camada fina de silício amorfo; modificar a superfície das células para impedir perdas por reflexão ótica, esculpindo micropirâmides	Desenvolvimentos na produção de células, construção de módulos e projeto dos painéis mais eficientes
Reinvenção das células solares	Associação de diferentes filmes finos, tais como silício amorfo com filme cristalino; células nanoestruturadas, painéis em alta concentração; conversão dos fótons transformando comprimentos de onda para melhorar a absorção	Viabilidade econômica da segunda geração e viabilidade técnica para a produção da terceira geração

Fonte: Elaboração própria.

> Os sistemas de concentração solar térmica utilizam lentes ou espelhos e seguidores solares para converterem a radiação solar típica em feixes concentrados, sendo estes utilizados como calor ou para alimentar uma central térmica. (...) Existem géneros muito variados de concentradores solares térmicos, entre os quais os de tubo parabólico, os de motor Stirling, os de reflector Fresnel, e os de chaminé/torre solar. Cada método é capaz de gerar altas temperaturas e eficiências termodinâmicas correspondentes, mas variam na forma como seguem o Sol e concentram a sua luz. As tecnologias estão progressivamente a tornar-se mais eficientes graças a inovações recentes. (Pinto, 2010)

Processos de geração e componentes

Existem dois diferentes processos de geração energética: geração direta, ou a que utiliza trocadores de calor, e fluidos de transferência.

A utilização de trocadores de calor permite o uso de temperaturas de operação menores, já que o fluido de transmissão não precisa ser evaporado. Tipicamente, um óleo sintético é utilizado no receptor. Esse óleo é, então, esquentado pela incidência dos raios solares convergidos. Mais tarde, em um trocador de calor, o calor do óleo é transmitido à água em um dispositivo trocador de calor e a água evaporada é utilizada na movimentação de uma turbina a vapor.

Para a geração direta, a água é evaporada diretamente no receptor e utilizada para movimentar uma turbina. Os custos são evidentemente menores, pois esse tipo de geração dispensa a utilização de alguns equipamentos utilizados em outros projetos (como os trocadores de calor, por exemplo). Além disso, o rendimento também é maior, tanto porque existe menos perda calorífica nos processos intermediários, quanto porque as maiores temperaturas de operação elevam a eficiência dos ciclos termodinâmicos presentes na geração energética. No entanto, existem desafios importantes para este tipo de projeto, tais como a dificuldade de obtenção de temperaturas altas o suficiente; utilização de matérias capazes de operar a temperaturas elevadas; e intermitência da geração solar a partir de armazenamento ou outras fontes energéticas para garantir que a água evapore, entre outros.

Concentradores

Apesar de apresentarem um principio de funcionamento físico semelhante, existem, atualmente, quatro diferentes principais tipos de tecnologia para a obtenção de energia elétrica a partir da energia solar térmica. Estes diferem não só na geometria de seus concentradores e potências geradas, mas também na mobilidade ou não de seus receptores, presença ou não de um sistema de resfriamento, entre outros fatores.

Receptores fixos são equipamentos estacionários que permanecem independentes dos instrumentos de focalização, o que facilita o transporte do calor coletado. Já os receptores móveis são acoplados aos dispositivos de focalização, permitindo coletar mais energia solar.

No que diz respeito ao foco, pode-se utilizar focos lineares quando os coletores perseguem o Sol ao longo de um único eixo e os espelhos focalizam a radiação para uma linha, facilitando o rastreamento solar. Além disso, podem-se adotar focos pontuais, quando os espelhos direcionam o Sol para um único ponto, facilitando a obtenção de maiores temperaturas, mas dificultando o rastreamento solar.

O quadro abaixo traz uma comparação entre as diferentes tecnologias:

Tabela 2.4 - Tabela comparativa dos tipos de concentradores

	Foco linear	Foco pontual
Receptor fixo	Refletores fresnel	Torres solares
Receptor móvel	Cilindros parabólicos	Discos parabólicos

Fonte: International Energy Agency.

Cilindros parabólicos

Apresentam fileiras de espelhos de até 100 m, curvados em forma de parábola, com cinco ou seis metros de comprimento e capazes de focalizar os raios solares que incidem perpendicularmente. Tubos de aço inoxidável estão localizados no foco linear do cilindro. Esses tubos estão isolados em vácuo dentro de um recipiente de vidro e são revestidos de forma a maximizar a absorção e minimizar a perda por emissão de radiação infravermelha.

O sistema possui um rastreador solar, trabalhando em um eixo de rotação com a finalidade de acompanhar a movimentação solar, permitindo que os espelhos mantenham-se em uma posição ideal em relação aos raios incidentes (perpendiculares).

Dentro desses tubos, o fluido de trabalho (geralmente óleo sintético) é aquecido pelos raios solares e, em seguida, passa por um trocador de calor, no qual transfere a energia térmica para a água, que muda de estado para vapor, sendo conduzido, em seguida, para uma turbina a vapor, convertendo a energia calorífica em energia mecânica. O eixo de rotação da turbina está acoplado a um gerador, que converte a energia mecânica em energia elétrica.

Por fim, o vapor superaquecido é resfriado e condensado, retornando ao trocador de calor para participar do ciclo novamente.

Refletores fresnel

Os refletores Fresnel aproximam-se de um formato parabólico através de uma longa fileira de pequenos espelhos planos ou ligeiramente curvados posicionados de modo contínuo. Esses espelhos focalizam os raios solares para um foco linear, onde é posicionado um receptor fixo. Em termos comparativos, o *design* simplificado dos refletores fresnel reduz os custos e o coletor fixo favorece a geração direta (isto é, sem necessidade de trocadores de calor), o que elimina a necessidade de fluidos de transferência, contribuindo também para a diminuição dos custos. No entanto, apresentam um rendimento inferior aos cilindros parabólicos.

Torres solares

O arranjo do sistema de torres solares é bem diferente dos demais. Ele é constituído de milhares de pequenos espelhos, nomeados heliróstatos, que focalizam os raios solares para um ponto focal distante, localizado no alto de uma torre fixa.

As temperaturas alcançadas no coletor são muito superiores àquelas encontradas nos cilindros parabólicos, o que permite a geração de energia direta, ainda que existam projetos que apresentem trocadores de calor. Apesar de ter custos bem superiores, a eficiência de conversão desse tipo de projeto é superior às demais.

Discos parabólicos

Uma superfície parabólica espelhada converge os pontos para um ponto focal da parábola, um pouco acima do centro da mesma, onde é localizado o coletor. O rastreamento solar move a estrutura de acordo com o movimento do Sol, perseguindo seu movimento em dois eixos diferentes (já que o foco é pontual).

A maioria dos projetos de discos parabólicos possui um gerador independente no ponto focal (um motor Stirling ou uma microturbina, por exemplo). Nesse sentido, a geração direta torna dispensável o fluido de transferência de calor, o processo de resfriamento e a condensação da água.

A limitação de tamanho restringe a potência gerada. No entanto, como a obtenção é independente e modular, um arranjo com vários discos pode aumentar a escala de produção.

O quadro a seguir apresenta uma comparação entre as principais características dos três principais tipos de tecnologia:

Tabela 2.5 - Principais características dos três principais tipos de tecnologia

Tecnologia	Cilindro parabólico	Torre central	Disco parabólico
Radiação solar mínima (W/m^2)	300	300	300
Classe de potência (MW)	30-40	30-200	0,010 – 0,050
Temperatura de operação (°C)	200-500	500-1.000	500-1200
Custo de investimento (USS/KW)	2.890-4.500	1.100-4.800	6.000-10.000
Custo de energia	60-130	120-185	270-330
Eficiência de pico	21	23	29
Eficiência anual global (%)	10-12 (d) 14-18 (p)	14-19 (p)	18-23 (p)
Fator de capacidade anual (%)	24(d)	25 a 70 (p)	25 (p)

Notas: (d) Demonstrado e (p) Previsto. Fonte: Elaboração própria.

Armazenamento térmico

O objetivo do armazenamento térmico é propiciar o aproveitamento do excesso de calor para gerar mais energia do que nos momentos em que a incidência solar é mínima. O excesso de energia é transmitido para algum material capaz de armazenar calor e, no momento em que há demanda, esse calor é trocado e volta a gerar energia elétrica. Dessa forma, a central pode armazenar energia e despachá-la em um momento de pico de demanda, no momento em que a energia custa mais caro. Atualmente, discute-se a utilização de sais fundidos (em especial cloretos, carbonatos e nitratos) para o armazenamento de calor. No entanto, outros materiais já foram utilizados em usinas experimentais, tais como água, óleo e rochas ou cerâmica.

As centrais heliotérmicas que apresentam armazenadores de calor possuem uma maior independência de outras fontes energéticas por compensar a intermitência da geração solar, permitindo a geração em momentos com pouca ou nenhuma incidência.

Em alguns casos, é possível que a obtenção energética nos horários de pico seja maior do que a capacidade da turbina a vapor da usina. Nesse caso, na ausência de um compartimento de armazenamento, alguns espelhos devem ser tirados do foco para evitar problemas de funcionamento. Nesse sentido, o armazenamento impede essa perda energética e permite a geração de energia, mesmo após o pôr do sol.

Tendências tecnológicas

Atualmente, as regiões com maior potencial energético heliotérmico possuem seus picos de demanda energética relacionados aos sistemas de refrigeração de ambientes, já que são regiões de clima tipicamente quente e árido. Dessa forma, o pico de demanda é coincidente com as condições ideais diárias e sazonais de geração, isto é, a maior demanda energética ocorre nos períodos de maior incidência solar, que são, justamente, os períodos ideias para a geração heliotérmica.

Por esse motivo, a energia heliotérmica é uma boa opção para atender às demandas de pico ou intermediárias e como uma fonte

complementar energética, visto que ainda não possui um custo de produção competitivo em relação às tecnologias fósseis. No entanto, cabe ressaltar que o mercado para as demandas altas e intermediárias é amplo, o que permite à tecnologia um desenvolvimento significativo, sem a necessidade de competição direta com as fontes fósseis.

Para que a energia heliotérmica torne-se competitiva, esforços e investimentos devem ser empregados para o desenvolvimento de novas tecnologias. A meta do US Department of Energy é tornar essa fonte energética amplamente competitiva na geração em demanda intermediária em 2015 e na geração de base em 2020. Esse desenvolvimento é contestado pelo estudo da International Energy Agency Technology Roadmaps Concentrating Solar Power, que prevê uma possível competição para os anos de 2025 e 2030 para as demandas intermediárias e de base, respectivamente.

Nesse contexto, inúmeros estudos vêm sendo realizados para aperfeiçoar o processo de obtenção energética nas mais variadas tecnologias heliotérmicas, podendo ser resumidas como a seguir:

Receptores lineares

Existe um esforço atual da pesquisa para aumentar o desempenho e diminuir os custos, principalmente dos componentes mecânicos do projeto. Os espelhos, por exemplo, podem ser substituídos por tecnologias mais baratas, tais como substratos de acrílico cobertos com prata, folhas flexíveis de alumínio cobertas com prata ou folhas de alumínio com cobertura de substratos de fibra de vidro. Também estão sendo desenvolvidos cilindros com maior abertura, o que potencialmente pode reduzir os custos. Procura-se ainda desenvolver revestimentos seletivos cada vez mais eficazes para o tubo receptor, a fim de maximizar a absorção da radiação incidente e minimizar as perdas por calor.

Além disso, a atual dificuldade da geração energética direta pela parte dos cilindros parabólicos deve ser contornada, sendo ela talvez a inovação que mais traria benefícios. Essa geração direta permitiria trabalhar com temperaturas mais altas (o que aumenta o rendimento da conversão), além de diminuir os custos com fluidos de transferência e trocadores de calor. Essa dificuldade possui basicamente três parâmetros:

Design

O receptor linear dos cilindros parabólicos movimenta-se juntamente com toda a estrutura no processo de rastreamento solar, visto que ele está acoplado aos espelhos curvos. Apesar de facilitar o rastreamento solar, a movimentação do receptor dificulta a obtenção de temperaturas tão altas de trabalho quanto aquelas dos refletores fresnel (que possuem receptores fixos). Além disso, dificultam a utilização de altas temperaturas e pressões com segurança.

Fluidos de trabalho

Os fluidos utilizados são geralmente vapor ou algum óleo orgânico (VP1 por exemplo – Diphenyloxide + biphenyl), que limitam a temperatura máxima de operação do sistema a aproximados 380°C, visto que para os valores superiores a este, o fluido degrada-se e compromete todo o processo de geração energética. O desafio é aumentar a temperatura de operação da próxima geração de projetos de cilindros parabólicos, sem que haja a necessidade do *backup* de combustível. Discute-se a utilização de nitratos fundidos como uma forma de contornar essa limitação.

Armazenamento

Não existem opções suficientemente eficazes de armazenamento energético quando a geração é direta. Para tal, deve-se projetar um sistema capaz de garantir a separação entre água e vapor, trabalhar com fluidos em altas pressões e temperaturas, o que é um desafio em se tratando de receptores móveis. Algumas soluções que aparecem nesse contexto passam pela utilização de fluidos de transferência altamente eficazes, capazes de armazenar a energia térmica sem grandes perdas. Algumas das tecnologias em estados de teste são:

- **Gás pressurizado:** Atualmente em teste na Plataforma Solar de Almeria, na Espanha. Apresenta gases pressurizados como fluidos de troca de calor, mas esforços adicionais devem ser empregados a fim de otimizar a troca de calor nos tubos receptores

- **Sais fundidos:** São sais em estado líquido, mas que nas CNTP apresentam estado sólido. Eles simplificam o projeto na medida em que são utilizados tanto como fluidos trocadores de calor, como fluidos de armazenamento. Para a aplicação em usinas heliotérmicas, discute-se principalmente a utilização de nitratos ou carbonatos fundidos. O processo é simples: o fluido é aquecido a grandes temperaturas e troca calor com a água, que evapora e alimenta uma turbina a vapor para a geração energética. O fluido ainda apresenta a capacidade de trocar calor e, então, é bombeado para um tanque, onde fica armazenado até uma nova demanda ser exigida. Dessa forma, os custos limitam-se ao bombeamento do fluido para o tanque reserva. No entanto, o monitoramento da temperatura do fluido é exigido, visto que estes se solidificam em temperaturas inferiores a 200°C, podendo comprometer o projeto.
- **Novos fluidos:** Novas opções de fluidos devem ser consideradas, em especial os nanofluidos. Eles são obtidos a partir da suspensão de partículas nanométricas em fluidos convencionais de transferência de calor, usualmente líquidos. Esses líquidos têm mostrado capacidade de troca de calor significativamente superior aos fluidos convencionais, tais como água, etileno-glicol, óleo, entre outros. Isto é devido, principalmente e entre outras possíveis razões, à maior ordem de grandeza da condutividade térmica dos sólidos utilizados nas suspensões. Em uma pesquisa do departamento de energia dos Estados Unidos, comprovou-se que a adição de nanopartículas a sais fundidos aumentam o calor específico do líquido de 10% a 75%. Estuda-se a dispersão de partículas de sílica, titânia, alumina e nanotubos de carbono, e soluções de carbonato e nitrato fundidas.

Os refletores lineares fresnel são naturalmente direcionados à geração direta, visto que possuem receptores fixos e, além disso, os desenvolvedores dessa tecnologia devem explorar as opções semelhantes àquelas apresentadas para os cilindros parabólicos.

Receptores pontuais

A otimização da tecnologia de torres solares passa por um alcance de maiores temperaturas de operação que maximizam a eficiência do ciclo termodinâmico empregado na geração energética (geralmente ciclo

Rankine – ORC). Com esse aumento de eficiência, mais calor é convertido em energia elétrica, o que diminui tanto a necessidade de armazenamento quanto os esforços necessários para a condensação do vapor que sai da turbina, o que diminui o custo do processo em si. Reduzir a quantidade de água empregada no processo de condensação é extremamente vantajoso, visto que os sítios com maior potencial de geração heliotérmica possuem um déficit natural na oferta de recursos hídricos. Ainda que exista uma alternativa de resfriamento seco do vapor, este é pouco eficiente, o que é um fator de diminuição do rendimento global do processo.

A utilização de novas faixas de temperatura de operação deve passar pelo emprego de novas tecnologias nos receptores. Uma das possíveis opções é o uso de ciclos de vapor superaquecido, como, por exemplo, as usinas termoelétricas modernas, que empregam temperaturas e pressões superiores às constantes críticas da água, tornando possíveis rendimentos de 42% até 46%. Para uma geração solar, essa tecnologia devera ser adaptada.

A geração direta aparece também como alternativa, ainda que apresente inúmeros obstáculos. Um sistema de controle refinado deve monitorar os coletores solares a fim de evitar problemas nos períodos de intermitência de radiação solar.

A utilização de armazenamento e transferência de calor via fluidos de alta capacidade térmica é uma das alternativas, já que torna a geração energética independente da radiação solar incidente instantânea, isto é, caso haja um período de menor incidência solar, já existe um fluido aquecido o suficiente para continuar o ciclo termodinâmico.

Ainda no contexto da geração direta, a utilização de sistemas híbridos também é uma alternativa a ser considerada, isto é, caso haja incidência solar insuficiente, outro combustível é utilizado para aumentar a temperatura do vapor continuamente, impedindo que o processo seja prejudicado.

Uma última alternativa é utilizar as altas temperaturas atingidas em projetos com focos pontuais para a obtenção química de hidrogênio combustível. A obtenção de energia elétrica a partir de hidrogênio vem sendo pesquisada e desenvolvida, sobretudo no setor de transportes,

sendo a obtenção do átomo do combustível um importante limitador do custo-benefício.

De acordo com pesquisas recentes, existem seis importantes marcos a ser alcançados pelas melhorias tecnológicas para uma real consolidação da energia solar térmica. São eles:

- Desenvolvimento da tecnologia de geração direta em cilindros parabólicos;
- Torres solares de larga escala com sais fundidos, como fluidos de transferência e armazenamento;
- Produção massiva de discos parabólicos com motores Stirling;
- Desenvolvimento de tecnologia para o armazenamento em geração direta;
- Desenvolvimento de tecnologia de torres solares com ciclos de vapor supercrítico;
- Desenvolvimento de tecnologia de torres solares com receptores com ar e turbinas a gás.

2.2. Energia eólica

A cadeira produtiva do segmento de produção de energia elétrica a partir da energia eólica está estruturada em cinco[13] grandes segmentos homogêneos, a saber: empresas de engenharia (projetos industriais); empresas produtoras de máquinas e equipamentos; empresas especializadas em transporte e instalação de máquinas e equipamentos; empresas fornecedoras de materiais e insumos; e empresas especializadas em serviços de manutenção e reparos.

1) No primeiro, estão as empresas de serviços de engenharia que planejam e dimensionam o parque eólico, fazendo o que se denomina anteprojeto ou projeto básico do parque eólico. As especificações técnicas dos equipamentos e a instalação são, na grande maioria das vezes, feitas pelos fabricantes de aerogeradores.

2) No segundo, estão todas as empresas de máquinas, equipamentos eletromecânicos e equipamentos eletroeletrônicos, além das

13. Ressalta-se que os serviços de distribuição e consumo da energia elétrica não fazem parte deste trabalho, que trata apenas da geração e da oferta de energia.

produtoras de máquinas e materiais elétricos. A indústria de aerogeradores é bastante verticalizada, fabricando também os principais componentes.

3) No terceiro, estão as empresas dedicadas às atividades de transporte de máquinas e equipamentos industriais em uso. Nesse grupo, encontram-se as empresas de transporte de grandes cargas e as empresas de montagem industrial responsáveis pela colocação das peças nas grandes alturas, nas quais se encontra a parte girante do aerogerador.

4) No quarto, estão os materiais e os insumos para a indústria de máquinas e equipamentos, envolvendo o segmento metal-mecânico e de material elétrico e eletrônico. Nesse grupo, estão as empresas fornecedoras de insumos para a fabricação de motores e geradores elétricos, redutores e caixas multiplicadoras, e equipamentos elétricos em geral.

5) No quinto, estão os serviços de manutenção e reparação de máquinas e equipamentos industriais utilizados nos aerogeradores.

6) Os serviços de distribuição e consumo da energia elétrica não fazem parte deste trabalho, que trata apenas da geração e da oferta de energia.

As empresas de serviços de engenharia fazem os levantamentos iniciais dos dados, realizam medições de vento no local escolhido, definem o *layout* dos aerogeradores no terreno e elaboram o anteprojeto (estudos de viabilidade técnica etc.) e o projeto básico. A medição dos ventos normalmente é contratada em uma instituição que possua equipamentos certificados, uma vez que o peso da velocidade do vento no cálculo da geração de energia é muito grande – é a velocidade elevada ao cubo.

Além disso, participam da implantação de um parque eólico empresas de engenharia prestadoras dos seguintes serviços: sondagem do solo, projeto de fundações, projeto de vias de acesso ao parque eólico, projeto de subestações, monitoramento ambiental, assim como empresas que fazem estudos para a integração da usina eólica no sistema elétrico interligado nacional. O transporte e a montagem dos equipamentos normalmente são realizados pelos fabricantes dos equipamentos, que contratam firmas especializadas para o transporte e a montagem industrial com guindastes de grande porte.

Os fabricantes de equipamentos normalmente assinam contratos de manutenção com o cliente dono do parque eólico. Esse fato é considerado muito positivo pelos bancos financiadores dos projetos, uma vez que dessa forma, é possível garantir a disponibilidade técnica dos aerogeradores, aumentando a rentabilidade do negócio.

Considerando que o foco central desse trabalho é a cadeia produtiva de bens de capital para a geração de energia eólica, o núcleo dessa cadeia está situado entre o segundo e o quarto dos cinco segmentos citados anteriormente, que estão direta ou indiretamente ligados à produção de materiais, peças e equipamentos constituintes de um aerogerador, que é a unidade básica de um sistema de produção de energia eólica chamado de parques eólicos.

Um parque eólico é constituído de aerogeradores, que pode ser representado esquematicamente pela **Figura 2.3**, que mostra as partes componentes dos três principais conjuntos de um aerogerador: torre, nacela e rotor, em uma árvore de subconjuntos hierarquizados decomposta em mais dois níveis, de forma a esclarecer o esquema geral de possibilidades de arranjo ao conceber um aerogerador.

Correlacionando as visões técnica e econômica de uma cadeia produtiva, os materiais e os equipamentos, que compõem um aerogerador, podem ser identificados nos segmentos, setores e produtos industriais da classificação industrial do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE – CNAE 2.0), formando assim, uma representação da engenharia do produto dentro de sua cadeia produtiva, como resumem as **Tabelas 2.6** e **2.7** a seguir.

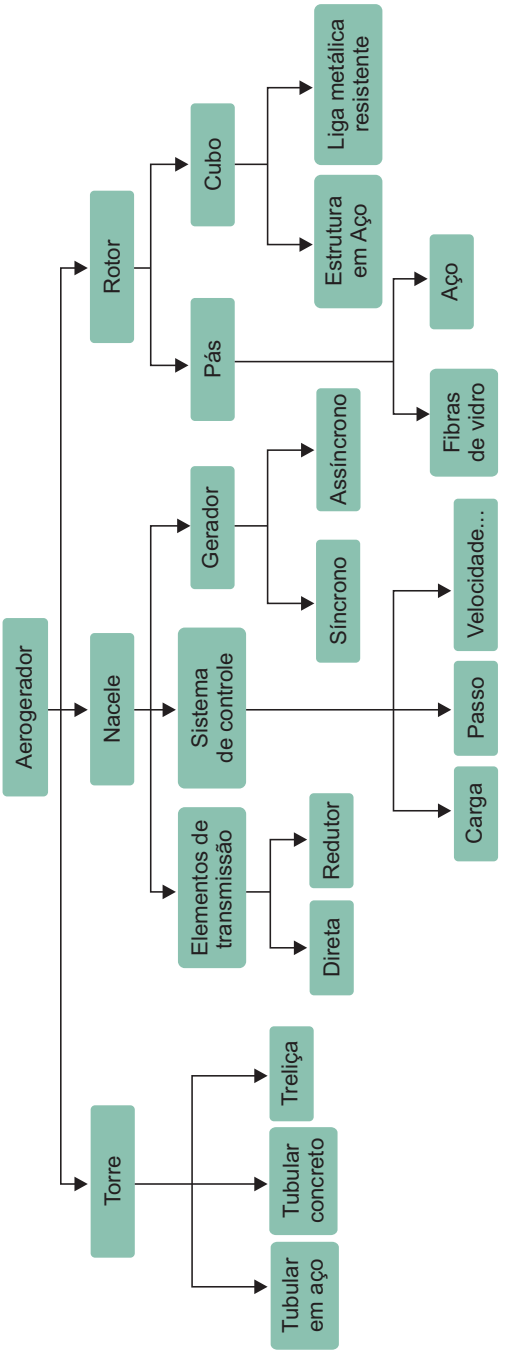


Figura 2.3
Árvore da composição de um aerogerador

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2.6 - Segmentos, setores e produtos da cadeia produtiva de geração de energia

Segmento	Setor industrial	Código CNAE	Produto
Serviços de engenharia	Serviço de consultoria em engenharia	7112-0 – Serviços de engenharia 7119-7 – Serviços de cartografia, topografia e geodésica	Projeto e instalação de parques eólicos
Produção de materiais	Fabricação de produtos de metal e outros não especificados	2811-9 – Turbinas a vapor e máquinas eólicas 2815-1/02- Equipamentos de transmissão para fins industriais	Estruturas metálicas (torres), compósitos poliméricos, fibra de vidro, fibra de carbono (pás)
Produção de peças e componentes	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	2511-6 – Fabricação de estruturas metálicas 2513-6 – Fabricação de obras em caldeiraria pesada 2229-3/99 – Artefatos de material plástico para outros usos	Ferragens eletrotécnicas para instalações de redes e subestações de energia elétrica e produtos diversos de metal não compreendidos em outras classes
Produção de máquinas e equipamentos elétricos e eletrônicos	Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	2710-4 – Geradores, transformadores e motores elétricos 2721-0 – Pilhas, baterias e acumuladores elétricos 2731-7 – Equipamentos para distribuição e controle de energia elétrica	Turbogeradores de corrente contínua e alternada, peças e acessórios, geradores, transformadores e motores elétricos, peças e acessórios, baterias e controladores de carga
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	Manutenção e reparação de máquinas e equipamentos elétricos	3321-0 – Instalação de máquinas e equipamentos industriais 3313-9/01 – Manutenção de geradores, transformadores e motores elétricos 3313-9/02 – Manutenção e reparação de baterias e acumuladores elétricos	Geradores, transformadores, motores, indutores, conversores, aparelhos e equipamentos de controle

Fonte: Elaboração própria.

Os segmentos sugeridos podem ser divididos da seguinte forma:

a) Materiais e insumos;

b) Sistemas eletromecânicos; e

c) Sistemas eletroeletrônicos.

A **Tabela 2.7** desdobra a classificação IBGE (CNAE 2.0), detalhando os produtos identificados e localizando-os nos segmentos da matriz IBKER,[14] a saber: materiais e insumos, sistemas eletromecânicos, sistemas eletroeletrônicos, sistemas auxiliares e de controle.

14. Cabe destacar que esta mesma matriz é utilizada para a análise IBK (indústria de bens de capital) das demais fontes investigadas. Os resultados obtidos com essa matriz são apresentados no Capítulo 4 deste relatório.

Tabela 2.7 - Cadeia produtiva da geração de energia elétrica eólica

Segmentos IBKER	Insumos e produtos industriais
Materiais e insumos (MAT)	Estruturas tubulares em aço e concreto (torres), compósitos em fibra de vidro (pás)
Sistemas eletromecânicos (SEM)	Aerogeradores, turbinas, rotores (pás e cubos), partes e peças para aerogeradores, turbinas e rotores
Sistemas eletroeletrônicos (SEE)	Geradores (síncrono e assíncrono) conversores de frequência, filtros de harmônicos, elementos de transmissão
Sistemas auxiliares e de controle (SAC)	Equipamentos para controle de energia elétrica, sistemas digitais de controle, controladores de carga e de velocidade (pitch ou stall), e sistemas de refrigeração

Fonte: Elaboração própria.

Os aspectos técnicos, os princípios de funcionamento e as tendências tecnológicas desse sistema são apresentados a seguir.

Princípio de funcionamento e componentes

O princípio de funcionamento dos aerogeradores (ou turbinas eólicas) é o de conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica para a geração de potência. O procedimento de transformação energética se dá com o escoamento do vento através das pás de um rotor, que faz funcionar um conjunto de engrenagens de redução e eixos acionadores de um gerador elétrico. Este último é responsável pela geração de eletricidade, que pode ser utilizada diretamente ou armazenada em baterias.

Existem diversos tipos de aerogeradores, das mais variadas formas construtivas. Tipicamente, eles podem ser divididos em dois grupos principais, agrupados a partir da disposição física de seus eixos principais: aerogeradores de eixo horizontal (HAWT – *Horizontal Axis Wind Turbine*) e aerogeradores de eixo vertical (VAWT – *Vertical Axis Wind Turbine*). É importante destacar que os aerogeradores de eixo horizontal são os de emprego mais difundido (praticamente a totalidade) nas plantas de geração de elevada potência. Os aerogeradores também podem ser classificados quanto ao porte: pequeno porte para potências abaixo de 10 kW, médio porte para potências entre 10 e 250 kW e grande porte para potências acima de 250 kW.

A configuração dominante dos aerogeradores é a de eixo horizontal, três pás e torre autoportante feita por calandragem de chapas de aço e constituída de seções cilíndricas superpostas a serem montadas no campo. Os aerogeradores demandam ventos com velocidade mínima para que entrem em funcionamento (da ordem de 3,5 m/s), operando dentro de uma faixa de velocidades no intervalo definido pela velocidade de corte (velocidade mínima) e pela velocidade limite de operação que varia de um modelo de aerogerador para outro. A velocidade máxima de um aerogerador é da ordem de 25 a 30 m/s.

A tendência atual é aumentar a potência e, consequentemente, o porte dos aerogeradores, havendo atualmente unidades de 7,5 MW no mercado, com uma torre de 108 m de altura. A potência de um aerogerador é proporcional ao diâmetro do rotor elevado ao cubo. Tendo em vista que o custo do transporte e a instalação são relativamente independentes do tamanho da máquina (dentro de certas faixas de potência) e que a intensidade do vento é maior à medida que a altura relativa ao solo aumenta, os equipamentos posicionados a uma altura mais elevada podem ter uma capacidade de geração superior à geração em alturas inferiores. A aplicação de equipamentos de maiores dimensões, e consequentemente com maiores alturas, é economicamente mais rentável.

Torre

A torre do aerogerador consiste na estrutura responsável por sustentar todos os componentes funcionais dele, podendo ser feita em concreto

armado (aço e concreto) ou apenas aço. As torres autoportantes possuem uma geometria cônico-tubular ou treliçada e são projetadas para suportar o peso de todo o sistema, assim como os esforços por conta da rotação das pás, da rotação da nacela e das cargas de vento sobre toda a estrutura.

As pás em rotação excitam as cargas cíclicas no conjunto com determinada frequência de rotação, o que pode provocar o fenômeno de ressonância. No projeto de torres, é necessário que a frequência natural do conjunto aerogerador seja diferente das frequências provocadas pelas massas girantes, de forma a não haver vibrações de grande amplitude e fadiga prematura dos componentes.

Atualmente, as torres podem alcançar alturas superiores a 100 m, o que resulta em uma montagem mais complexa do equipamento. Torres de grandes dimensões são feitas em módulos para viabilizar seu transporte pelas rodovias de acesso ao parque eólico. Na maioria das vezes, o fabricante do aerogerador é o responsável pela instalação da torre nas dependências do cliente; a fabricação e a montagem desse componente podem representar mais de 20% do custo total do equipamento. A **Figura 2.4** mostra e descreve a base de uma torre que abriga os componentes eletrônicos do sistema de geração.

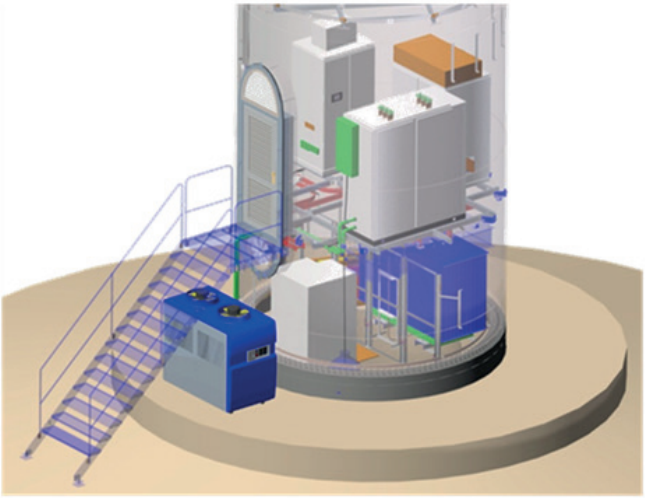


Figura 2.4 - Torres

Normalmente, na base das torres dos grandes aerogeradores encontram-se os componentes de "eletrônica de potência", responsáveis pela conversão da energia gerada no padrão da rede elétrica nacional.

Os principais componentes instalados na base das torres são: transformador principal, conversor de frequência, filtro de harmônicos, painel de controle e sistema de refrigeração.

Fonte: Elaboração própria.

Rotor

O conjunto rotor de um aerogerador é composto de um cubo e pás, que são fixadas por meio de parafusos ao cubo, uma peça metálica na qual é conectado o sistema eletromecânico de geração de energia. As pás podem ser feitas em fibra de vidro, fibra de carbono ou *kevlar* por infusão a vácuo, rotomoldagem ou laminação manual.

O projeto das pás é feito pelos fabricantes dos aerogeradores, uma vez que sua aerodinâmica deve ser compatível com os demais componentes do equipamento, assim como com o perfil de ventos do local onde o equipamento irá trabalhar. As pás são formadas por dois componentes principais: uma longarina central laminada recoberta por uma "casca" com perfil aerodinâmico adequado ao equipamento e a sua aplicação. A pá não é um componente padronizado; a maioria dos fabricantes de aerogeradores projeta e fabrica suas próprias pás, porém, existem no mercado empresas fornecedoras de pás a partir das especificações dos fabricantes.

O cubo do conjunto rotor é uma peça com formato esférico, construída em liga metálica de aço de alta resistência onde são fixadas as pás por meio de flanges. É uma peça de grandes proporções que sofre processo de usinagem em máquinas-ferramenta de grande porte. É o componente responsável pela conversão da energia cinética contida nos ventos em energia mecânica de rotação do conjunto. O cubo pode apresentar rolamentos para a fixação das pás, como também pode acomodar mecanismos e motores para o ajuste do ângulo de ataque de todas as pás.

A forma mais usual de limitar a potência de um aerogerador é através do controle aerodinâmico do efeito do vento sobre as pás. Existem dois tipos: um denominado "controle de passo" (*pitch*) e outro denominado "controle por estol" (*stall*). O controle de passo é uma forma de controle ativo, onde a limitação da potência do aerogerador é alcançada através da rotação da pá em torno de seu eixo longitudinal, aumentando seu ângulo de passo e reduzindo o ângulo de ataque. O controle por estol é uma forma de controle passivo, obtido através do efeito aerodinâmico de descolamento do fluxo de vento. Neste caso, as pás são fixas e o controle atua automaticamente quando, ao ocorrerem velocidades de vento superiores à nominal, o escoamento em torno do perfil da pá descola de sua superfície, reduzindo, com isso, a força de sustentação.

Nacele

É o componente montado sobre a torre que abriga o gerador, o redutor (quando aplicável), os dispositivos para a medição da velocidade e direção do vento, assim como os componentes responsáveis pela rotação do conjunto para seu melhor posicionamento em relação à direção do vento. A nacele pode abrigar parte do sistema de controle do aerogerador, o sistema de refrigeração de óleo e o sistema de freio de emergência, dependendo da opção de projeto escolhida por cada fabricante.

Alguns fabricantes desenvolveram equipamentos sem o redutor através do acoplamento direto do rotor ao gerador, conforme pode ser visto no esquema mostrado a seguir. Esses equipamentos utilizam um gerador síncrono com estator de grande diâmetro com elevado número de polos e funcionando com excitação por corrente contínua.

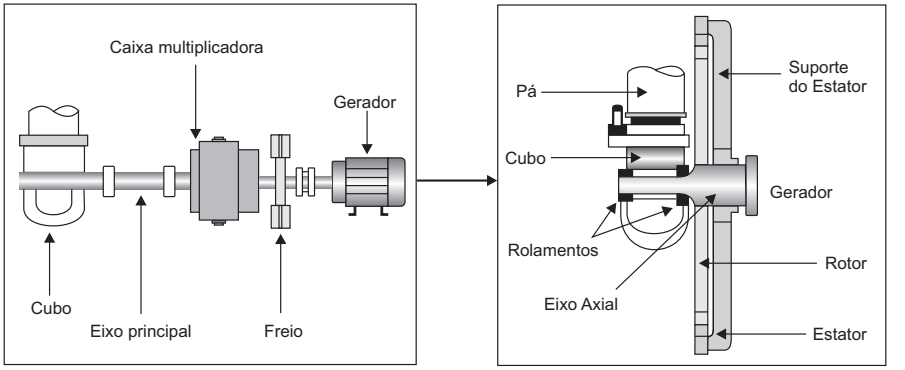


Figura 2.5 - Nacele

Fonte: Elaboração própria.

A nacele e a base da torre concentram os componentes destinados à ligação do equipamento com a rede elétrica. O atendimento aos requisitos da ANEEL relativos à qualidade da energia fornecida ao sistema elétrico nacional em face da não regularidade dos ventos é a principal dificuldade a ser superada pelos fabricantes de aerogeradores.

Tendências tecnológicas

As oportunidades de desenvolvimento tecnológico em energia eólica continuarão centradas na transmissão de energia elétrica com corrente contínua em alta voltagem (HVDC) e nos geradores síncronos de ímã permanente (PMSG), associados ao desenvolvimento de conversores inteligentes (eletrônica de potência) capazes de se adaptar rapidamente às mudanças das condições de captação e conversão da energia, que são instáveis por sua própria natureza.

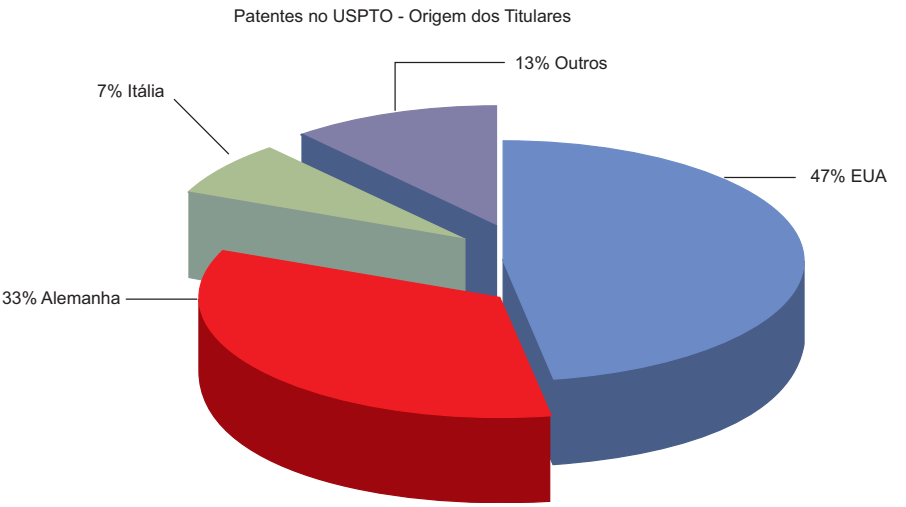
A estrutura da nacele, a torre e o transformador de grande porte são equipamentos mais atrativos para a produção local em função do seu baixo conteúdo tecnológico e peso elevado, o que vem direcionando a localização das fábricas de aerogeradores para as regiões onde o potencial eólico é alto. A Wobben, por exemplo, tem sua principal fábrica em Sorocaba/São Paulo e duas outras no nordeste, perto dos parques eólicos em instalação: uma em Pecém no Ceará e outra em Parazinho no Rio Grande do Norte.

Para ter um melhor entendimento das tendências tecnológicas no setor, foi feita uma busca no sistema internacional de patentes que mostra um crescimento acelerado do registro de patentes no INPI. No período de 2000 a 2004, foram registrados cerca de 50 patentes sobre o tema turbinas eólicas no INPI, em contraste com cerca de 200 patentes registradas no período de 2005 a 2009.

Considerando apenas a base de patentes americanas (US Patent Office - USPTO) consultada para o período de 2008-2009, observa-se que 47% das patentes são de origem americana, seguidas de 33% originárias da Alemanha. A Alemanha, em termos comparativos, é o principal país no desenvolvimento tecnológico de aerogeradores e um dos principais países a utilizar energia eólica na geração de energia para consumo doméstico.

Figura 2.6
Patentes concedidas USPTO

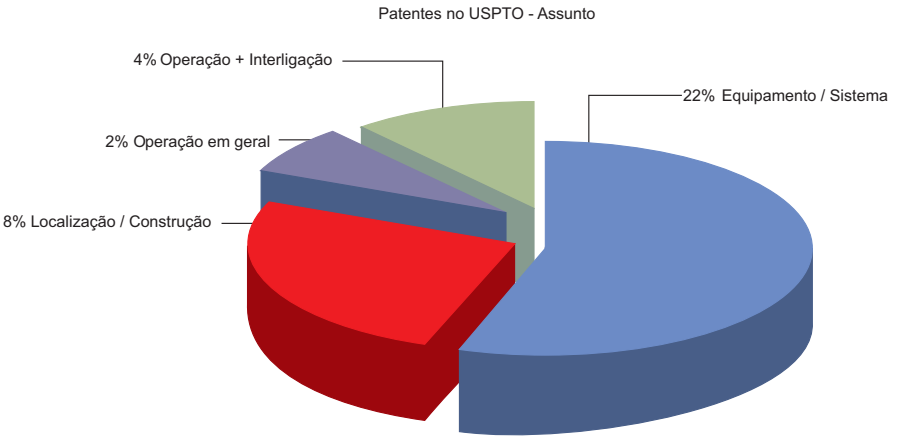
Fonte: USPTO, 2010.



O aerogerador e seus subsistemas concentram cerca de 60% das patentes encontradas no período, ficando cerca de 22% para a instalação e a construção, seguidos por uma ligação com a rede com cerca de 11%. Isso confirma o aspecto "sistema modular fechado" relativo à configuração do conjunto "pás-rotor-redução-gerador", para o qual as oportunidades de desenvolvimento tecnológico no Brasil estão restritas, até o presente momento, à adaptação climática de equipamentos e ao desenvolvimento de pás mais adequadas ao perfil de vento do país.

Figura 2.7
Patentes por área do conhecimento

Fonte: USPTO, 2010.



2.3. Energias tradicionais

2.3.1. Geração de eletricidade a partir da biomassa

A cadeira produtiva do segmento de produção de energia elétrica a partir de biomassa está estruturada em cinco grandes segmentos homogêneos, a saber: empresas de engenharia (projetos industriais); empresas especializadas em instalação de máquinas e equipamentos; empresas fornecedoras de materiais e insumos; empresas produtoras de máquinas e equipamentos; e empresas especializadas em serviços de manutenção e reparos.

- No primeiro, estão as empresas de serviços de engenharia que dimensionam, planejam e projetam a usina, os equipamentos e participam da instalação.
- No segundo, estão as empresas dedicadas às atividades de instalação, manutenção e reparação de máquinas e equipamentos industriais em uso.
- No terceiro, estão os materiais e os insumos envolvendo os segmentos agroindustriais (biomassa) e a fabricação de produtos químicos (oxigênio, reagentes, fluidos orgânicos).
- No quarto segmento, estão todos os produtos de metal, máquinas e equipamentos eletromecânicos, produtos e equipamentos eletroeletrônicos, máquinas e materiais elétricos.
- No quinto, estão os serviços de distribuição e consumo da energia elétrica gerada pelo mercado.

Considerando que as tecnologias e os equipamentos de transformação de biomassa primária ou secundária (resíduos agroindustriais) em energia elétrica são o foco central deste trabalho, o núcleo desta cadeia está na produção industrial propriamente dita, ou seja, o terceiro e o quarto segmentos. Relacionando esses segmentos da cadeia produtiva com os setores da CNAE 2.0 e os insumos utilizados e/ou os produtos gerados, têm-se os esquemas contidos nas **Tabelas 2.8** e **2.9**.

Tabela 2.8 - Segmentos, setores e produtos da cadeia produtiva de termoelétricas a partir de biomassa

Segmento	Setor industrial	Produto
Serviços de instalação da usina	Instalação de máquinas e montagem de equipamentos	Caldeiras, motores estacionários, turbinas, equipamentos hidráulicos e pneumáticos, compressores e semelhantes
Materiais agroindustriais e produtos químicos	Produtos agroindustriais; fabricação de produtos químicos inorgânicos e orgânicos (petroquímicos)	Biomassa (matéria-prima); gases industriais (oxigênio, ar líquido ou ar comprimido), fluidos orgânicos (siloxanos, tolueno, etilbenzeno, butilbenzeno etc.)
Produção de peças e componentes	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	Fabricação de caldeiras geradoras de vapor, inclusive aparelhos auxiliares, partes e peças para caldeiras e condensadores
Produção de equipamentos	Fabricação de máquinas e equipamentos (motores, bombas, compressores e equipamentos de transmissão)	Motores e turbinas (gás e vapor), equipamentos hidráulicos, pneumáticos, partes e peças para motores, válvulas, registros e dispositivos semelhantes, compressores, equipamentos de transmissão para fins industriais
Produção de máquinas e equipamentos elétricos e eletrônicos	Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos e fabricação de equipamentos de informática e produtos eletrônicos	Geradores, transformadores e motores elétricos (inclusive conversores), pilhas, baterias e acumuladores elétricos, aparelhos e equipamentos p/ controle de energia elétrica, aparelhos e equipamentos de medida, teste e controle

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 2.9 - Classificação CNAE a partir de biomassa

Setor industrial	Código CNAE
Serviços de consultoria em engenharia	7112-0 – Serviços de engenharia
Fabricação de produtos de metal e outros não especificados	2811-9 – Turbinas a vapor e máquinas eólicas 2815-1/02- Equipamentos de transmissão para fins industriais
Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	2511-6 – Fabricação de estruturas metálicas 2513-6 – Fabricação de obras em caldeiraria pesada 2812-7/00 – Fabricação de equipamentos hidráulicos e pneumáticos
Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos	2710-4 – Geradores, transformadores e motores elétricos 2721-0 – Pilhas, baterias e acumuladores elétricos 2731-7 – Equipamentos para distribuição e controle de energia elétrica
Manutenção e reparação de máquinas e equipamentos elétricos	3321-0 – Instalação de máquinas e equipamentos industriais 3313-9/01 – Manutenção de geradores, transformadores e motores elétricos 3313-9/02 – Manutenção e reparação de baterias e acumuladores elétricos 3311-2 – Manutenção de tanques, reservatórios metálicos e caldeiras

Fonte: Elaboração própria.

A **Tabela 2.10** apresenta um desdobramento da classificação do IBGE (CNAE 2.0) detalhando os produtos identificados, localizando-os nos segmentos da matriz IBKER, a saber: materiais e insumos, sistemas eletromecânicos, sistemas eletroeletrônicos, sistemas auxiliares e de controle.

Tabela 2.10 - A cadeia produtiva da termoeletricidade a partir de biomassa por segmentos da IBKER

Segmentos IBKER	Insumos e produtos industriais
Materiais e insumos	Biomassa, gases industriais (oxigênio, ar comprimido), adesivos, selantes e aditivos, fluidos orgânicos
Sistemas eletromecânicos	Caldeiras, motores estacionários, turbinas, compressores, partes e peças para motores, válvulas, registros, equipamentos hidráulicos e pneumáticos
Sistemas eletroeletrônicos	Geradores, transformadores e motores elétricos (inclusive conversores) pilhas, baterias e acumuladores elétricos
Sistemas auxiliares e de controle	Aparelhos e equipamentos p/ controle de energia elétrica (painéis de controle), sistemas hidráulicos e pneumáticos (sistemas autônomo, supervisório e escada)

Fonte: Elaboração própria.

A produção de energia através de biomassa pressupõe a decomposição da matéria orgânica em seus elementos constitutivos e pode ser feita por processo termoquímico, combustão em caldeiras ou pirólise, gaseificação em gaseificadores ou por processo bioquímico com o auxílio de bactérias em biodigestores. Os primeiros geram, respectivamente, gás e vapor, que acionam turbinas ou motores que alimentam um gerador elétrico. A principal diferença entre os primeiros e o último, além da rota ou do processo químico, é a escolha da biomassa. No caso da biodigestão, utiliza-se qualquer matéria orgânica composta de rejeitos mistos de natureza animal e vegetal como a parte orgânica do lixo urbano ou dejetos de animais em área rural.

Os processos termoquímicos de conversão de biomassa em energia estão resumidos por Rocha e Perez (2007) de forma esquemática na **Figura 2.8**, que indica as tecnologias de processamento e dos produtos – intermediários e finais.

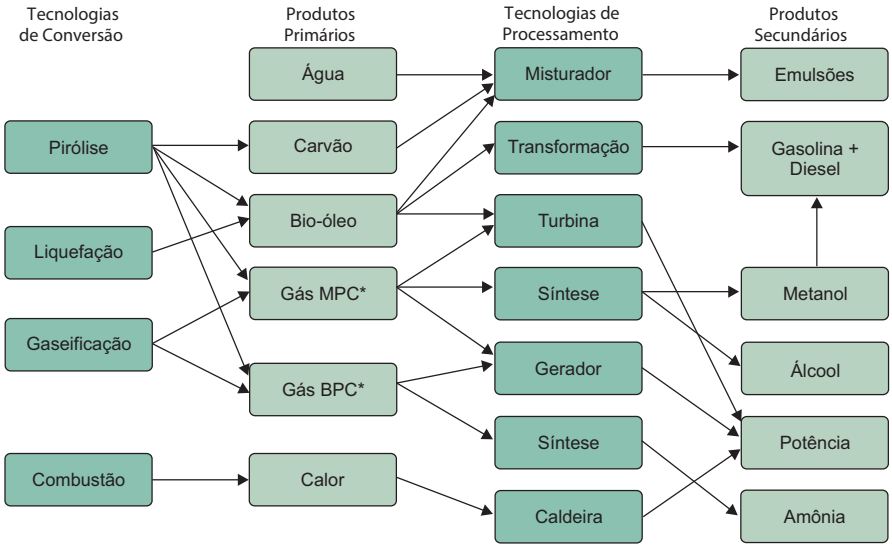


Figura 2.8
Tecnologias de processamento e dos produtos

Nota: *MPC e BPC significam médio e baixo poder calorífico.

Fonte: Rocha e Perez (2007).

As rotas tecnológicas para a geração de termoeletricidade através de biomassa primária ou secundária podem ser reunidas em dois sistemas básicos:

1) O ciclo a vapor, que é o mais tradicional e está em uso comercial há mais de 100 anos, processa a queima direta da biomassa (fornos e caldeiras) alimentando motores e turbinas a vapor; as evoluções tecnológicas recentes desse sistema são o Ciclo Orgânico Rankine (ORC) (Lora, 2011, p. 451).

2) O sistema gaseificador-ciclo a gás, que é o mais moderno, ainda está em fase de demonstração comercial e desenvolvimento tecnológico com boas perspectivas, seja associado às microturbinas a gás ou em rotas alternativas via motores ou células a combustível (Lora, 2011, p. 162-166).

O ciclo a vapor é uma tecnologia centenária em uso comercial para as potências acima de 2 MW (megawatts), tornando-se ainda mais competitivo acima de dezenas de megawatts. Para a geração de energia em pequena escala com faixas de potência entre 200 e 500 kW, a faixa de potência dos geradores disponíveis no mercado brasileiro, a eficiência das caldeiras flamotubulares e turbinas de exaustão para o acionamento de moendas está em torno de 5% (Lora, 2011, p. 111).

Uma evolução recente do ciclo a vapor é o chamado Ciclo Orgânico Rankine (ORC), que é um ciclo a vapor que, ao invés de água, usa substâncias orgânicas, tais como o fluido. Para os fluidos orgânicos, a expansão isentrópica conclui-se num estado de vapor superaquecido, ao invés do estado de vapor saturado, como no caso do ciclo a vapor d'água. A potência desses sistemas varia entre 400 e 1.500 kW. A grande difusão desse sistema se deu na Europa (Áustria, Suíça, Itália e Alemanha) onde, em 1994, havia 11 unidades instaladas e em 2008, totalizavam 50 usinas em operação.

Os principais elementos de um sistema ORC são: fornalha para combustão, trocador de calor e turbina. Na fornalha de combustão da biomassa, os gases quentes são utilizados para o aquecimento do óleo térmico até aproximadamente 300°C, o qual é utilizado apenas como fluido de transferência de calor. A utilização do óleo térmico apresenta vantagens, tais como a possibilidade de operação da caldeira em baixa pressão, grande inércia, insensibilidade às mudanças de carga e a utilização de um sistema de controle simples e seguro (Lora, 2011, p. 115).

O trocador de calor do tipo evaporador é o elemento onde o óleo térmico à alta temperatura transfere calor para o fluido de trabalho orgânico, evaporando-o. O fluido de trabalho pode ser tolueno, isopentano, isoctano ou óleo polisiloxano (Gard, 2008). O fluido térmico, após passar pelo condensador, passa através de outro trocador de calor (regenerador), onde recupera parte da energia ainda contida nele na saída do turbogerador. Após passar pelo regenerador, o fluido orgânico retorna ao evaporador (Lora, 2011, p. 116).

A principal característica dos ciclos ORC que utilizam biomassa como combustível são os maiores níveis de temperaturas, geralmente com uma temperatura máxima do fluido orgânico ao redor de 327°C e temperatura de condensação em torno de 97°C,e isto restringe a seleção do fluido. Ainda segundo Lora, os fluidos de uso mais comum têm sido os da família de siloxanos, que apresentam um bom desempenho termodinâmico, boas propriedades lubrificantes e estabilidade térmica, são inodoros, não tóxicos e dificilmente inflamáveis.

Contudo, estudos recentes mostram que a utilização de outros fluidos orgânicos com propriedades mais adequadas às altas temperaturas, típicas das instalações ORC com biomassa, poderiam aumentar a

eficiência do ciclo. Assim, a eficiência elétrica do ciclo ORC com octametiltrisiloxano (OMTS) é de 22,5%, com tolueno 23,2%, etilbenzeno 24,3%, propilbenzeno 24,9% e butilbenzeno 24,5% (Dresher e Bruggemann, 2007).

Outro equipamento que pode ser usado para a geração de energia a partir de biomassa é o motor Stirling. Criado por Robert Stirling em 1816, é um motor a combustão externa, no qual a energia térmica é transferida dos gases de combustão ao fluido de trabalho através de um trocador de calor.

As limitações ao uso desse motor até hoje são a falta de material adequado para a fabricação dos trocadores de calor e do pistão quente, a dificuldade de selagem do motor que opera a alta pressão – em torno de 40 a 80 bar – e a pressão atmosférica. Sua faixa de capacidade é menor que 100 kW, sendo assim mais adequado para as aplicações em regiões isoladas de baixo consumo. Os estudos sobre esse motor vêm sendo realizados em universidades e centros de pesquisa da Dinamarca, Áustria, Alemanha, Japão e Brasil, na Universidade Federal de Itajubá, através do Núcleo de Excelência em Geração Térmica e Distribuída (NEST).

Uma nova rota tecnológica é a do ciclo a gás, que opera com gases de combustão ou ar quente. Este sistema é conhecido como turbina de queima externa EGT (*Externally Fired Gas Turbine*) ou turbina de ar quente (*Hot Gas Turbine*).

O ar é aquecido mediante a queima da biomassa em uma caldeira acoplada a um trocador de calor a alta temperatura. A queima é realizada utilizando o próprio ar de exaustão da turbina a gás. Esse sistema pode funcionar com diversas biomassas provenientes de processos agrícolas e de silvicultura, e não apresenta problemas relacionados com a composição e a limpeza do gás de combustão.

Essas tecnologias estão em diferentes estágios de desenvolvimento. Assim, para cada projeto, é necessário analisar a situação para selecionar a tecnologia que mais se ajusta aos requisitos da matéria-prima (tipo de biomassa) ou à demanda do cliente, como, por exemplo, quanto à potência a ser gerada. Desse modo, a seleção da tecnologia mais apropriada é condicionada não só ao desempenho técnico, mas também à situação local determinada.

Como resultados dos novos desenvolvimentos tecnológicos, o Ciclo Orgânico Rankine e os motores a vapor vêm despontando no mercado mundial e nacional, ocupando espaços de domínio quase exclusivo das grandes turbinas de ciclo a vapor.

A **Tabela 2.11** apresenta, por faixas de potência, as principais vantagens e desvantagens das tecnologias atuais em uso (vapor e gás), assim como as novas tecnologias em desenvolvimento.

Tabela 2.11 - Principais indicadores técnicos das novas tecnologias de geração de eletricidade a partir da combustão de biomassa

Tecnologia	Potência (kW)	Vantagens	Desvantagens
Ciclo Orgânico de Rankine	100-1200	Bom desempenho a cargas parciais, tecnologia robusta e desenvolvida	O óleo término é inflamável e tóxico
Turbina a gás com queima externa	50-500	Alta eficiência	Tecnologia não madura, trocador de calor, difícil seleção de materiais e alto estresse térmico, alto custo
Turbina a vapor	>500	Tecnologia comercial, ampla faixa de potências	Alto custo de investimento e operação, baixa eficiência, alto custo para pequenas capacidades (< 1000 kWe)
Motor Stirling	10 - 75	Baixo custo de manutenção, baixo nível de ruído, flex (combustível)	Selagem difícil; alto custo e baixa durabilidade dos materiais do trocador quente
Motor a vapor de pistão	50 - 1200	Bom desempenho a caga parcial, menor exigência do tratamento de água	Alto custo de manutenção, vibrações e ruído
Motor a vapor de rosca	200 - 2500	Bom desempenho a carga parcial, vapor saturado, baixo custo de manutenção	Pouca experiência de operação, alto nível de ruído

Fonte: Lora (2011).

A **Figura 2.9** apresenta a situação atual das diferentes tecnologias para a geração de energia elétrica a partir da combustão de biomassa. Conforme pode ser observado, o Ciclo Orgânico Rankine, assim como

os motores Stirling, motores a vapor e turbinas de queima externa encontram-se em fase pré-comercial, com algumas plantas-piloto em operação na Europa e nos Estados Unidos.

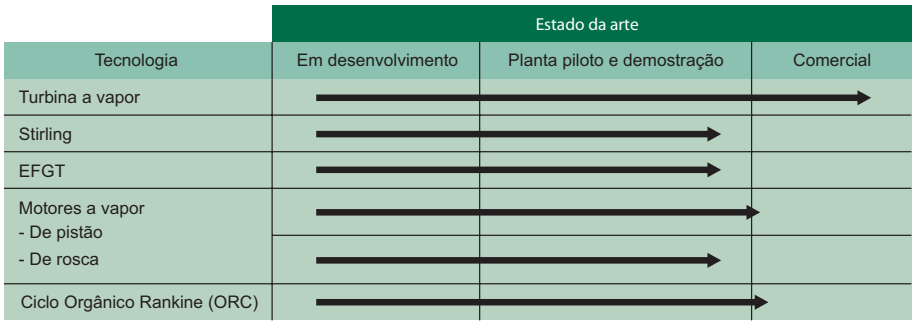


Figura 2.9
Estado da arte das diferentes tecnologias para a geração de eletricidade em pequena escala, a partir da combustão de biomassa

Fonte: Lora (2011, p. 163).

A **Figura 2.10** apresenta as faixas de potência de aplicação das tecnologias para a geração em pequena escala a partir da combustão de biomassa. Conforme pode ser observado, são aplicações de pequena escala na faixa de potência entre 100 e 1.000 kW. Para as potências nessa faixa, existem várias opções tecnológicas, tais como o motor Stirling, Ciclo Rankine ORC, turbina a gás de queima externa, turbinas a gás e motores de combustão interna. Para as potências acima de 1.000 kW, as turbinas a vapor são a tecnologia dominante.

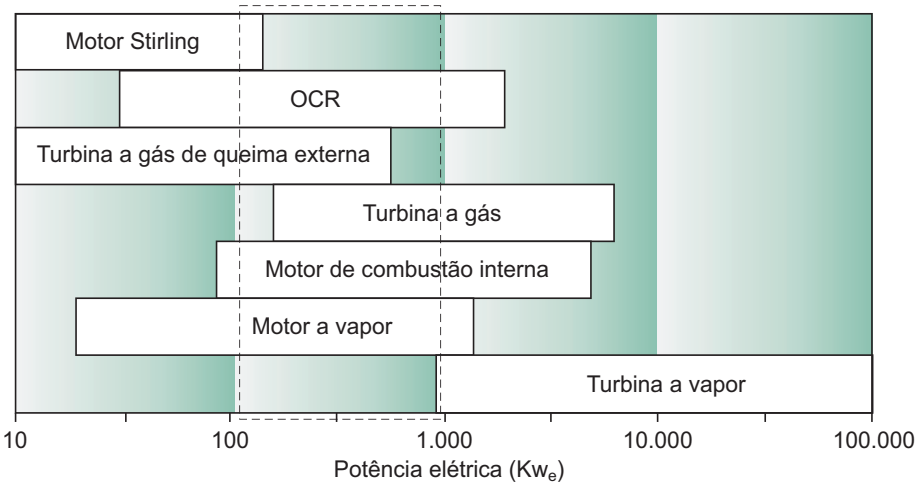


Figura 2.10
Faixas de potência das tecnologias para a geração de eletricidade partir de biomassa

Fonte: Lora (2011, p. 163).

A **Figura 2.11** apresenta a eficiência elétrica das tecnologias de combustão da biomassa em função da potência. Conforme pode ser observado para a geração de energia elétrica em pequena escala, as opções com turbinas de queima externa e motores Stirling são as que apresentam a melhor eficiência energética.

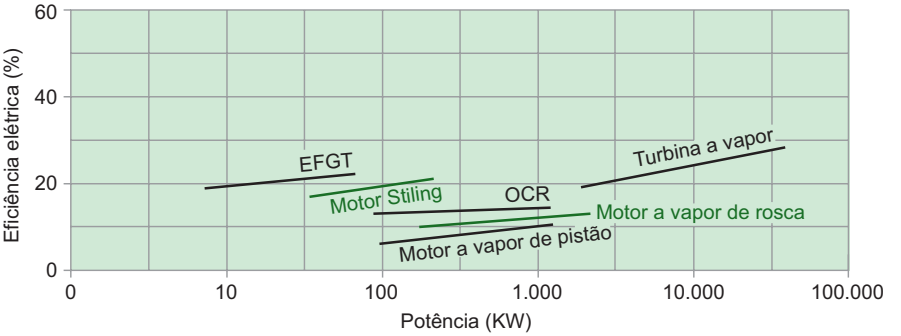


Figura 2.11
Eficiência elétrica das tecnologias de combustão de biomassa para a geração em pequena escala

Fonte: Lora (2011).

As tecnologias, processos e principais equipamentos para a geração de eletricidade a partir de biomassa estão ilustrados na **Tabela 2.12**.

As tecnologias envolvidas nos sistemas de produção de termoeletricidade a partir da biomassa podem ser representadas pelos seus principais equipamentos: gaseificador (ciclo a gás), caldeira (ciclo a vapor), turbina, gerador e painéis de controle.

O gaseificador é um reator químico onde ocorre o processo de gaseificação em quatro etapas físico-químicas distintas com temperaturas de reação diferentes. Podem ser de leito fixo ou fluidizado. Complementarmente, podem ainda ser classificados quanto ao tipo de fluxo que ocorre durante o processo: contracorrente, concorrente, e fluxo cruzado.

O gás obtido pode ser utilizado como combustível, em um grupo motor-gerador (baixas potências até cerca de 600 – 1.000 kW), turbina a gás (acima de 1 MW) ou, ainda, queimado conjuntamente com outros combustíveis em caldeiras.

Tabela 2.12 - Energia a partir de biomassa: tecnologias, processos e componentes

Tecnologias	Processos	Componentes
Ciclo a vapor tradicional	A combustão da biomassa na caldeira gera vapor que move a turbina conectada ao gerador. O vapor é resfriado no condensador convertido em água e volta pelos tubos à caldeira	Caldeira, turbina, gerador, condensador, sistemas auxiliares de bombeamento de água e tratamento de gases, e painéis de controle.
Ciclo Orgânico Rankine (ORC)	Segue o mesmo processo de um ciclo a vapor tradicional, mas ao invés de água, usa como fluido de trabalho substâncias orgânicas	São os mesmos do ciclo tradicional com turbinas radiais e demais elementos adaptados à capacidade e ao fluido orgânico
Motor a pistão	Substitui a turbina com vantagens: menor sensibilidade à umidade, maior eficiência operacional em cargas parciais elevadas e baixa exigência de qualidade da água.	Caldeira, motor-gerador a pistão, condensador, sistemas auxiliares de bombeamento de água e exaustão de gases, e painéis de controle.
Motor a rosca	O motor a rosca é compacto -substitui a turbina - e dispensa a caldeira, dispondo de um superaquecedor na entrada para receber a biomassa	O motor a rosca é composto de rotores macho e fêmea, eixo, engrenagens, mancal e carcaça, que forma uma câmara de funcionamento
Motor Stirling	Motor de combustão externa que transfere energia térmica ao fluido de combustão através de um trocador de calor	O motor Stirling pode ser acoplado a uma fornalha, caldeira ou ainda gaseificador
Ciclo a gás Turbina de queima externa EFGT	O ar é aquecido pela queima externa da biomassa em caldeira acoplada a um trocador de calor, usando o próprio ar da exaustão da turbina a gás	Turbina a gás e gerador ou, em rotas alternativas, motor a gás ou célula combustível, e sistemas auxiliares de tratamento de gases e painéis de controle

Fonte: Elaboração própria.

Equipamentos de geração de energia a partir de biomassa

Caldeiras

Num ciclo a vapor tradicional, a biomassa é queimada numa caldeira. A caldeira é o conjunto formado pela fornalha, grelhas, dutos de gases e superfícies de aquecimento, por onde circula o fluido de trabalho.

As caldeiras podem ser convencionais (combustão sobre grelhas), mais utilizadas em fontes primárias de energia para gerar vapor para o processo, e de recuperação ou leito fluidizado (recuperação química), que recuperam o calor dos gases de exaustão gerados no processo de aquecimento ou combustão. Estas últimas são as mais modernas e de maior eficiência e produtividade de energia de cogeração. Além disso, esse tipo de caldeira – leito fluidizado borbulhante ou circulante – é amplamente utilizado pela indústria de papel e celulose para a cogeração de energia. Ela permite ainda a queima de outros materiais, o que prolonga a oferta de energia na falta de biomassa primária, o que é interessante para as usinas de açúcar e álcool.

Quanto ao projeto de construção, há dois tipos de caldeiras convencionais:

- Aquatubulares: os gases circulam por fora dos tubos, enquanto a água circula por dentro dos tubos; e
- Flamotubulares: os gases circulam por dentro dos tubos, aquecendo a água que circula por fora destes.

Os principais equipamentos de uma caldeira convencional podem ser visualizados na **Figura 2.12**.

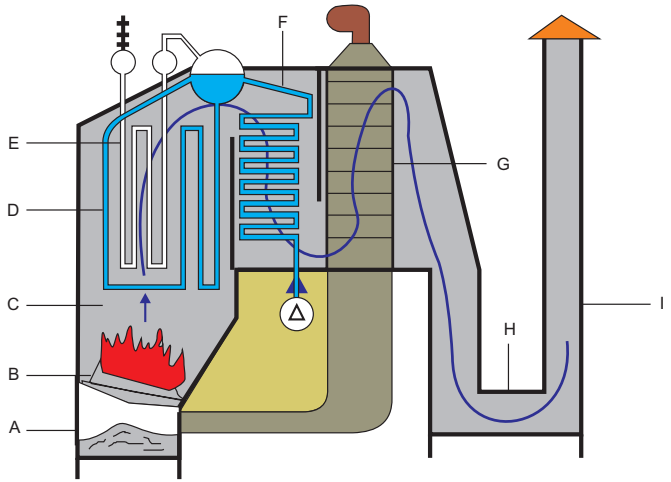


Figura 2.12
Principais componentes de uma caldeira aquatubular

Fonte: Martins (2006).

a) **Cinzeiro**: depósito de cinzas ou resíduos
b) **Fornalha**: local da combustão com grelha ou queimado
c) **Seção de irradiação**: são as paredes da câmara de combustão
d) **Seção de convecção**: feixe de tubos de água que recebem calor
e) **Superaquecedor**: trocador de calor (vapor)
f) **Economizador**: trocador de calor (água)
g) **Pré-aquecedor de ar**: trocador de calor (ar)
h) **Exaustor**: faz a exaustão dos gases
i) **Chaminé**: lançamento dos gases de combustão

Para a geração de grandes quantidades de vapor, são utilizadas caldeiras aquatubulares. As cadeiras flamotubulares são utilizadas para equipamentos de pequeno porte.

As caldeiras flamotubulares, em sua grande maioria, possuem uma capacidade de geração de vapor reduzida (cinco toneladas por hora) e na faixa de 20 bars a 30 bars.

As principais vantagens das caldeiras flamotubulares em relação às aquatubulares são:

- Tamanho compacto, permitindo seu fácil transporte desde a fábrica até o local de uso e futuras relocalizações;

- Melhor eficiência na troca de calor por área de troca térmica;
- Maior flexibilidade para as variações bruscas de consumo de vapor;
- Operação simples com reduzido número de instrumentos de supervisão e controle;
- Baixo custo de manutenção, que se limita às etapas de limpeza e troca dos tubos.

As caldeiras flamotubulares são as mais indicadas para as instalações de pequeno porte: motores a pistão e de rosca.

Turbinas (a vapor e a gás)

As turbinas são máquinas de altíssimas potências que convertem energia pneumática (vapor, ar comprimido e gases sob altas pressões) em energia mecânica; quando acopladas a um gerador, transformam a energia mecânica em energia elétrica. A forma construtiva básica é: um rotor dotado de um certo número de pás ou palhetas, ligados a um eixo que gira sobre um conjunto de mancais. O vapor movimenta as pás da turbina conectada a um gerador de eletricidade. O vapor é resfriado em um condensador, a partir de um circuito de água de refrigeração, e não entra em contato direto com o vapor que, convertido outra vez em água, retorna aos tubos da caldeira (onde se dá a combustão), reiniciando o ciclo.

O gaseificador é um reator químico onde ocorre o processo de gaseificação em quatro etapas físico-químicas distintas com temperaturas de reação diferentes. Podem ser de leito fixo ou fluidizado. Complementarmente, podem ainda ser classificados quanto ao tipo de fluxo que ocorre durante o processo: contracorrente, concorrente e fluxo cruzado.

O gás obtido pode ser utilizado como combustível em um grupo motor-gerador (baixas potências até cerca de 600 – 1.000 kW), em uma turbina a gás (acima de 1 MW) ou ainda, queimado, conjuntamente com outros combustíveis em caldeiras.

Independentemente da composição do material de entrada (biomassa), teor de umidade ou umidade relativa do ar, a composição química e o poder calorífico do gás do produto mantêm-se estáveis.

A composição tem entre 50% a 60 % de hidrogênio, dióxido de carbono, monóxido de carbono, frações menores de metano, etano, propano e nitrogênio. O poder calorífico é de 13.000 (**Figura 2.13**).

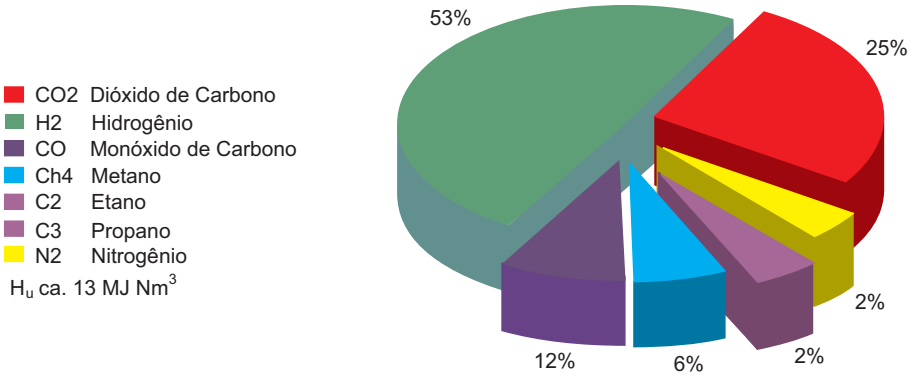


Figura 2.13
Composição do gás produzido

Fonte: http:// www.edrb.com.br/gas_biomassa.html

Etapas do processo de gaseificação

- **Secagem da biomassa:** apresenta um controle de temperatura para garantir a secagem da biomassa e evitar sua decomposição.
- **Pirólise:** é a decomposição química por calor na ausência de oxigênio. O combustível do reator pirolítico pode ser proveniente da biomassa, resíduos agroindustriais, industriais ou até mesmo doméstico. Esses resíduos devem ser previamente selecionados e triturados. A pirólise ocorre a uma temperatura de cerca de 400°C.
- **Combustão:** é a combinação de uma fonte combustível com o oxigênio, sendo esse processo em geral exotérmico e autossustentável. A reação da combustão ocorre em torno de 900°C e 1.300°C.
- **Redução:** os gases quentes da zona de combustão passam para a zona de redução, sempre adjacente, acima ou abaixo, onde na ausência de oxigênio, ocorre o conjunto de reações típicas que originam os componentes combustíveis do gás produzido.

Equipamentos auxiliares do processo de pirólise-gaseificação

- Filtros de limpeza dos gases;
- Ciclones ou precipitadores eletrostáticos para a captação de material particulado e lavadores de gases para a captação de gases ácidos, tais como SOx e NOx.

2.3.2. Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH)

A implantação de pequenas centrais hidrelétricas requer a participação de empresas das seguintes atividades: empresa de engenharia para a elaboração do anteprojeto e estudo de viabilidade econômica, empresa de engenharia para a elaboração do projeto básico e da implantação, construtora para as obras civis, empresa integradora dos fornecedores de equipamentos, fornecedores de equipamentos (unidades geradoras, auxiliares elétricos, auxiliares mecânicos e equipamentos hidromecânicos), setor de engenharia do proprietário, empresa de montagens industriais e empresa de operação e manutenção.

A seguir, estão descritas as atividades fora do escopo deste trabalho, porém necessárias para a execução de um projeto em PCH.

No primeiro grupo, estão as empresas de serviços de engenharia que fazem os estudos preliminares em campo para estabelecer as áreas a serem inundadas, a localização da barragem e a casa de força, assim como identificar outras instalações e equipamentos auxiliares necessários para o empreendimento. Estes primeiros trabalhos levam em consideração uma avaliação do relevo na região e das terras a serem inundadas, assim como dos recursos hídricos, de forma a desenvolver o estudo de viabilidade econômica e a tomada de decisão de realização do investimento.

O segundo grupo de atividades é constituído pela empresa de engenharia de projeto que faz as especificações da construção civil, a especificação de equipamentos do empreendimento. A essa empresa, cabe em uma primeira fase a responsabilidade por estudos geológicos, hidráulicos e de impacto ambiental, assim como a especificação dos equipamentos a serem instalados.

Em uma segunda fase, realiza o detalhamento do projeto civil e numa terceira fase, acompanha as obras, prestando o suporte técnico necessário em toda a fase de implantação. A construtora assume todos os trabalhos de limpeza e desmatamento da área, movimentação de terra, abertura de túneis, escavação de fundações e construção das estruturas de concreto. O setor de engenharia do proprietário do empreendimento está presente nessa fase, controlando o andamento dos trabalhos e verificando se as especificações técnicas estão sendo atendidas.

Dado que o foco deste trabalho é a cadeia produtiva de bens de capital para a geração de energia por PCH, a cadeia produtiva PCH inicia-se a partir da especificação dos equipamentos da usina.

1) O primeiro segmento é constituído pela empresa de projeto de engenharia que é a responsável pela especificação dos equipamentos a serem instalados na usina, assim como pela identificação das interfaces dos equipamentos com as obras civis a serem realizadas. Além desta, existe a empresa integradora dos fornecedores de equipamento que coordena todo o fornecimento de equipamentos e a definição das interfaces com os fornecedores de segundo nível, assim como com a construtora.
2) O segundo segmento é o dos fabricantes de equipamentos que estão direta ou indiretamente ligados à produção de materiais, peças e equipamentos constituintes de turbinas hidráulicas e geradores, que são os equipamentos básicos de um sistema de PCH. Além disso, há os equipamentos de eletrônica de potência, responsáveis pelo controle do sistema de geração e distribuição.
3) O terceiro segmento é constituído das empresas de montagem industrial que realizam as instalações dos equipamentos no campo. A empresa de montagem é a responsável pelo recebimento dos equipamentos, armazenagem na obra, montagem, acabamento e pintura final dos equipamentos. A montagem dos equipamentos na usina é feita sempre com o acompanhamento de um supervisor do fabricante, de modo a assegurar a qualidade total do serviço.
4) O quarto segmento refere-se à empresa operadora do sistema, normalmente a proprietária do empreendimento. Ela é responsável pela operação da usina e sua manutenção. Normalmente, participa da fase de comissionamento dos equipamentos, de forma a acelerar seu aprendizado.

Considerando que o foco central deste trabalho é a cadeia produtiva de bens de capital para a geração de energia, o núcleo dessa cadeia está situado no segundo e no terceiro segmentos. Correlacionando as visões técnica e econômica de uma cadeia produtiva, assim como os materiais e equipamentos que compõem um sistema de PCH, pode-se identificar o setor como pertencendo à classe 28.11 da CNAE 2.0, conforme as **Tabelas 2.13** e **2.14** a seguir.

A **Tabela 2.14** a seguir desdobra a classificação IBGE (CNAE 2.0) detalhando os produtos identificados localizando-os nos segmentos da matriz IBKER, a saber: materiais e insumos, sistemas eletromecânicos, sistemas eletroeletrônicos, sistemas auxiliares e de controle.

Tabela 2.14 - Cadeia produtiva da geração de energia elétrica em PCH

Segmentos IBKER	Insumos e produtos industriais
Materiais e insumos (MAT)	Chapas de aços especiais – aço silicioso de grão não orientado, materiais isolantes (inclusive poliamida, poliéster e resinas epóxi)
Sistemas eletromecânicos (SEM)	Geradores, turbinas hidráulicas, rotores (pás e cubos), partes e peças do grupo gerador (GG)
Sistemas eletroeletrônicos (SEE)	Geradores (síncrono) reguladores eletrônicos de carga e elementos de transmissão
Sistemas auxiliares e de controle (SAC)	Equipamentos para o controle de energia elétrica, sistemas digitais de controle, reguladores de carga, de fluxo e velocidade, sistemas de refrigeração

Fonte: Elaboração própria.

Tendências tecnológicas em PCH

Os aspectos técnicos, princípios de funcionamento e componentes, inovações recentes e principais desafios tecnológicos para o desenvolvimento futuro do sistema de geração de energia em pequenos volumes d'água e pequenas quedas são apresentados a seguir.

Funcionamento e componentes

A PCH é toda usina hidroelétrica de pequeno porte cuja capacidade instalada é superior a 1 MW e inferior a 30 MW. O princípio de funcionamento das pequenas centrais hidrelétricas é o mesmo das grandes usinas.

Tabela 2.13 - Segmentos, setores e produtos da cadeia produtiva de geração de energia em Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs)

Segmento	Setor industrial	CNAE	Produto
Serviços de Engenharia	Serviço de Engenharia civil	7112-0 – Serviços de engenharia 7119-7 – Serviços de cartografia, topografia e geodésica	Projeto e obras de construção civil
Produção de materiais	Siderurgia (laminados planos de aços especiais) e fabricação de produtos de metal e outros não especificados	2811-9 – Turbinas a vapor e máquinas eólicas 2815-1/02- Equipamentos de transmissão para fins industriais	Bobinas, chapas e folhas em aços especiais/ ligados (aços ao silício, aços inoxidáveis) obtidos na laminação, a quente e a frio; materiais isolantes
Produção de peças e componentes	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	2511-6 – Fabricação de estruturas metálicas 2513-6 – Fabricação de obras em caldeiraria pesada 2812-7/00 – Fabricação de equipamentos hidráulicos e pneumáticos	Subestações, casas e cabines de força, quadros de comando e distribuição; disjuntores, chaves, seccionadores, comutadores, reguladores de voltagem, isoladores completos e semelhantes para sistemas de distribuição de energia; ferragens eletrotécnicas para instalações de redes e subestações de energia elétrica
Produção de máquinas e equipamentos elétricos e eletrônicos	Fabricação de máquinas, aparelhos e materiais elétricos	2710-4 – Geradores, transformadores e motores elétricos 2721-0 – Pilhas, baterias e acumuladores elétricos 2731-7 – Equipamentos para distribuição e controle de energia elétrica	Turbogeradores de corrente contínua e alternada, peças e acessórios, geradores, transformadores e motores elétricos, baterias e controladores de carga
Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	Manutenção e reparação de máquinas e equipamentos elétricos	3321-0 – Instalação de máquinas e equipamentos industriais 3313-9/01 – Manutenção de geradores, transformadores e motores elétricos 3313-9/02 – Manutenção e reparação de baterias e acumuladores elétricos 3311-2 – Manutenção de tanques, reservatórios metálicos e caldeiras	Geradores, transformadores,turbinas, indutores, conversores, aparelhos e equipamentos de controle

Fonte: Elaboração própria.

O objetivo é aproveitar o potencial hidráulico de um fio d´água, rio ou barragem para a geração de energia elétrica. A passagem da água movimenta uma turbina que, ligada a um gerador, transforma a energia cinética da turbina em energia elétrica.

Uma PCH típica é a turbina que opera a fio d'água, ou seja, aquela que não exige regularização do fluxo de água. Assim, nas ocasiões de estiagem, o fluxo pode ser insuficiente para o funcionamento da usina. Por outro lado, quando a vazão é maior do que a capacidade de "processamento" das máquinas, há passagem de água pelo vertedor e perda de eficiência hidráulica.

Enquanto as clássicas turbinas Pelton, Turgo, Francis são usadas em grandes quedas d'água, as do tipo Kaplan ou tipo hélice são as mais adequadas para as pequenas quedas, e são muito bem aproveitadas na aplicação PCH. A Turgo foi desenvolvida a partir da Pelton, enquanto a Kaplan é similar à Francis, diferenciando-se apenas pelo rotor.

Essas turbinas se caracterizam por terem uma roda formada por pás ajustáveis, as quais constituem uma série de canais hidráulicos que recebem a água radialmente e a orientam para a saída do rotor segundo uma direção axial. Se as pás são móveis e variam o ângulo de ataque, diz-se que a turbina é do tipo Kaplan, caso sejam fixas, recebem o nome de hélice. As partes construtivas de uma turbina Kaplan são: caixa espiral, pré-distribuidor, distribuidor, rotor e eixo, além dos tubos de sucção. Seus componentes são descritos quanto à composição e ao funcionamento a seguir:

Caixa espiral: é uma tubulação de forma toroidal que envolve a região do rotor. Essa parte fica integrada à estrutura civil da usina, não sendo possível ser removida ou modificada. O objetivo é distribuir a água igualmente na entrada da turbina. Fabricada com chapas de aço carbono soldadas em segmentos, a caixa espiral conecta-se ao conduto forçado na seção de entrada e ao pré-distribuidor na seção de saída.

Pré-distribuidor: a finalidade do pré-distribuidor é direcionar a água para a entrada do distribuidor. É uma parte sem movimento, soldada à caixa espiral e fabricada com chapas ou placas de aço carbono, composta de dois anéis superiores, entre os quais são montados um conjunto de palhetas fixas, com perfil hidrodinâmico de baixo arrasto, otimizando sua influência na perda de carga e turbulência no escoamento.

Distribuidor: o distribuidor é composto de uma série palhetas móveis, acionadas por um mecanismo hidráulico montado na tampa da turbina (sem contato com a água). Todas as palhetas têm o seu movimento conjugado e o acionamento é feito por um ou dois pistões hidráulicos que operam numa faixa de pressão de 20 bars nas mais antigas e até 140 bars nos modelos mais novos. O distribuidor controla a potência da turbina, pois regula vazão da água. É um sistema que pode ser operado manualmente ou de modo automático, tornando o controle da turbina praticamente isento de interferência do operador.

Rotor e eixo: o rotor da turbina é onde ocorre a conversão da potência hidráulica em potência mecânica no eixo da turbina. No caso das hélices ou Kaplans, as pás do rotor têm a forma da hélice de navios. Quando o eixo é bilateral, ocorre uma conversão de potência elétrica, o eixo faz a locomoção dos pistões e quando isso ocorre, há uma descarga elétrica que faz o seguimento agir.

Tubo de sucção e descarga: o duto de saída da água, geralmente com um diâmetro final maior que o inicial, desacelera o fluxo da água após esta ter passado pela turbina, devolvendo-a ao rio.

Inovações e desafios tecnológicos para as PCHs

As turbinas para PCH são derivadas das turbinas convencionais, realizando algumas adaptações para a aplicação dos equipamentos em pequenas quedas, geralmente inferiores a 25 m.

Turbinas hidrocinéticas

São turbinas desenvolvidas para gerar energia elétrica através da vazão do rio sem a necessidade da construção de barragens ou condutos forçados; é composta apenas por um grupo gerador instalado no leito do rio.

Adaptações Kaplan e hélice

O rotor Kaplan possui as mesmas características do rotor hélice, exceto pelo fato de haver pás móveis que permitem a regulagem da vazão através dele, o que confere a esse tipo de turbina a chamada dupla regulagem. Ambos os rotores podem ser inseridos em uma caixa espiral de concreto ou aço, em caixa aberta ou ainda, em caixa em forma de

tubo, onde o escoamento se dá totalmente no sentido axial. Para esse último arranjo, dependendo da configuração do grupo gerador, se dá o nome de turbina tubular, em "S", sifão ou bulbo. A turbina bulbo se caracteriza pelo arranjo compacto, denotado pelo uso de um rotor Kaplan acoplado ao gerador, que, por sua vez, é instalado no interior de um casulo inserido na água, daí o nome "bulbo".

Turbina bulbo

A turbina bulbo apresenta-se como uma solução compacta da turbina Kaplan, podendo ser utilizada tanto para pequenos quanto para grandes aproveitamentos. Caracteriza-se por ter o gerador montado na mesma linha da turbina em posição quase horizontal e envolto por um casulo que o protege do fluxo normal da água. É empregada na maioria das vezes para os aproveitamentos de baixa queda e quase sempre de fio d'água.

Turbina do tipo S

São aplicadas para as pequenas quedas. São, na verdade, uma adaptação de outras turbinas para a flexibilização da operação, de forma a simplificar a montagem e a manutenção. O fluxo de água é conduzido por um duto, no qual o gerador está inserido. A água em movimento passa, então, pela turbina e movimenta o rotor. O esquema está demonstrado abaixo.

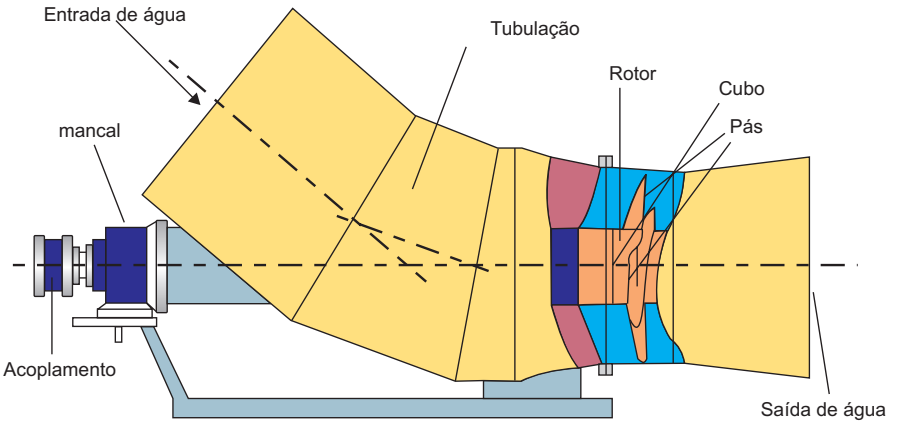


Figura 2.14
Modelo de turbina S

Fonte: Elaboração própria.

A **Tabela 2.15** a seguir resume os principais desafios tecnológicos das partes e dos componentes para o aumento da eficiência do sistema PCH, baseado na contribuição dos especialistas participantes do comitê técnico deste trabalho.

Tabela 2.15 - Desafios tecnológicos em PCH

Componentes	Desenvolvimentos tecnológicos
Turbinas hidráulicas	Projeto e otimização de turbinas hidráulicas através de modelagem numérica
Turbinas com impactos ambientais positivos	Amigáveis aos peixes, com um sistema de oxigenação da água
Turbinas para usinas de maré-motrizes	Fluxo sob pressão Fluxo livre
Aproveitamentos de baixas quedas	Barragens móveis Comportas fusíveis Casa de máquinas integradas ao vertedor Novos desenhos de tomadas de água
Geradores	Turbinas hidráulicas de pequenas e grandes potências Geradores de altas eficiências a custo menores (uso de nanotecnologia) Geradores de alto torque e pequenas potências Uso de GG com rotação variável
Sistema de adução	Novas configurações para a tomada de água Revestimento de canais Outros materiais para condutos forçados Uso de outros dispositivos para a atenuação de transitórios (válvula de alívio auto-operada)
Canal de fuga	Modelagem matemática para o aumento da eficiência do canal Interação do canal de fuga com o tubo de sucção da máquina

Fonte: Elaboração própria.

3. Estrutura da oferta da indústria de bens de capital para energia renovável

Introdução

Este capítulo analisa as principais características e tendências econômicas da indústria de bens de capital para energia renovável (IBKER). Como em toda indústria que responde às decisões de investimento – público e privado –, os segmentos de bens de capital aqui estudados são portadores de uma dinâmica econômica bastante complexa. As decisões de investir – neste caso, adquirindo máquinas e equipamentos para a produção de energia elétrica – são sempre tomadas em condições de incerteza em relação à demanda futura e, por conseguinte, em relação às expectativas de retorno sobre o capital investido.

No caso da aquisição de bens de capital para energia renovável, essa incerteza é ainda maior. Como já foi observado, no Brasil e no mundo as chamadas fontes de energia renovável vivem uma efervescência significativa. A alta – aparentemente estrutural – dos preços dos hidrocarbonetos tem motivado um forte crescimento da pesquisa, desenvolvimento e fabricação de todo tipo de equipamento para a produção de energia a partir de fontes renováveis com preços sensivelmente menores do que há uma década.

Além disto, governos – sobretudo nos países centrais – vêm implementando políticas de desenvolvimento sustentável, nas quais as iniciativas sobre energia renovável têm um papel crescente. Neste mesmo sentido, consumidores mais abastados e imbuídos de uma consciência ambiental têm sido menos resistentes a pagar preços mais elevados pela chamada **energia verde**.

As ações dos governos e dos consumidores de energia, associadas ao incentivo econômico propiciado pela busca por substitutos viáveis aos combustíveis fósseis e nucleares, têm provocado um forte crescimento na demanda por equipamentos para energia renovável. Destacam-se, nesta direção, a demanda por equipamentos para a energia eólica e para a geração de energia fotovoltaica – as duas fontes que mais cresceram no mundo, em especial na Europa e nos EUA.

Neste sentido, a demanda por equipamentos para energia renovável é crescente, mesmo em condições de muita incerteza. Essa incerteza é grande porque ainda perduram muitas indefinições sobre o marco

regulatório, sobre a persistência de incentivos fiscais e tributários, sobre as escolhas tecnológicas ou ainda, sobre a concorrência internacional (há evidências de sobreacumulação e excesso de oferta em vários segmentos). Nesse ambiente de indefinições econômicas e institucionais, os investimentos podem ser contidos podendo alterar rapidamente o futuro dessa indústria, como, por exemplo, o encilhamento financeiro ocorrido nos governos europeus – os maiores incentivadores e financiadores da expansão da energia verde – provocado pela crise europeia de 2008-2011.

Porém, é importante ressaltar que não faz parte do escopo deste trabalho analisar o futuro das fontes de energia limpa ou ainda o comportamento recente e futuro da demanda por equipamentos. Mesmo assim, é fundamental pontuar que o futuro da oferta de equipamentos para energia renovável, objeto do estudo que se segue, reside num cenário em constante mutação e de alta complexidade econômica, no qual as indefinições da demanda futura têm importantes reflexos na estrutura da oferta presente.

Para analisar a estrutura da oferta de equipamentos para energia renovável no Brasil e no mundo, optou-se por segmentar o setor de acordo com as fontes de energia primária. Desta forma, a seção 3.1 a seguir irá analisar a indústria de equipamentos para a produção de energia fotovoltaica. No item 3.2, serão analisadas as características econômicas dos equipamentos voltados para a energia eólica. E finalmente, na seção 3.3, serão apresentadas as informações relativas aos equipamentos para as fontes renováveis "tradicionais", a saber: equipamentos para termoelétricas abastecidas por resíduos orgânicos (biomassa) e bens de capital para a as chamadas Pequenas Centrais Hidrelétricas. Encerram o capítulo as notas de conclusão.

3.1. Equipamentos para energia solar fotovoltaica

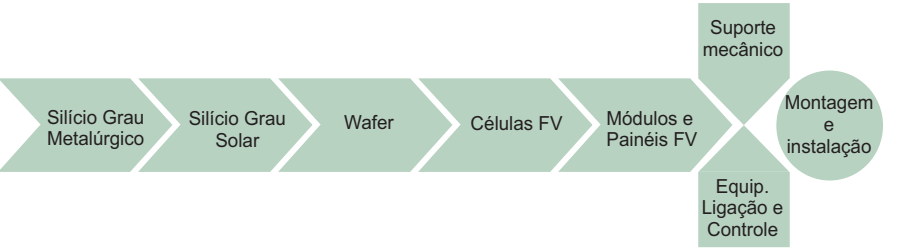
3.1.1. Características econômicas

O segmento de equipamentos para energia solar fotovoltaica está inserido numa cadeia produtiva que difere bastante dos equipamentos das demais fontes de energia. A **Figura 3.1** descreve sucintamente a estrutura da cadeia de equipamentos fotovoltaicos.

A cadeia se inicia com a produção de lingotes metálicos de silício (grau metalúrgico), a partir da mineração e do tratamento inicial de quartzo. Em seguida, através de dois processos principais, a saber, a rota química e a rota metalúrgica, ocorre a purificação dos lingotes de silício em um patamar superior a 99,999%.[15] Neste estágio, conhecido como obtenção de silício grau solar, são produzidas lâminas (*wafer*) de silício purificado, que é a principal matéria matéria-prima para a produção de células fotovoltaicas. Tais células, quando oriundas da produção de silício, podem ser de silício monocristalino (de maior pureza, maior eficiência, maior preço) ou policristalino (menor pureza, menor eficiência, menor preço). É nestas nessas células semicondutoras que, através de um processo físico-químico, ocorre a transformação da radiação solar em energia elétrica.

15. Vale ressaltar que o tratamento do silício pela rota química permite também a purificação no grau eletrônico, de pureza superior ao grau solar. O silício grau eletrônico é a principal matéria prima dos semicondutores, base de toda a moderna indústria eletrônica.

Figura 3.1
Cadeia simplificada de equipamentos fotovoltaicos: uma proposta analítica



Fonte: Elaboração própria a partir de CTI (2011).

Aqui, vale ressaltar que nem todo módulo fotovoltaico tem origem no uso de células produzidas a partir de silício mono e policristalino. Embora essas duas tecnologias tenham sido responsáveis, em 2010, por 86% das células fotovoltaicas produzidas mundialmente (ver **Figura 3.2**), tem havido um crescente uso de tecnologias de filmes finos. *Grosso modo*, tais tecnologias lançam mão de outras substâncias fotossensíveis que são depositadas em camadas ultrafinas com materiais mais baratos, tais como vidro ou chapas de metal (EPIA, 2011, p. 22).

Ainda que tenham menor eficiência (ver **Tabela 3.1**), essas tecnologias alternativas ao silício cristalino podem ter mais aplicações, graças à flexibilidade do "módulo" fotovoltaico, com destaque para as soluções civis e arquitetônicas (por exemplo, integração da unidade geradora de energia à fachada ou aos telhados de edificações desde o projeto e a construção).

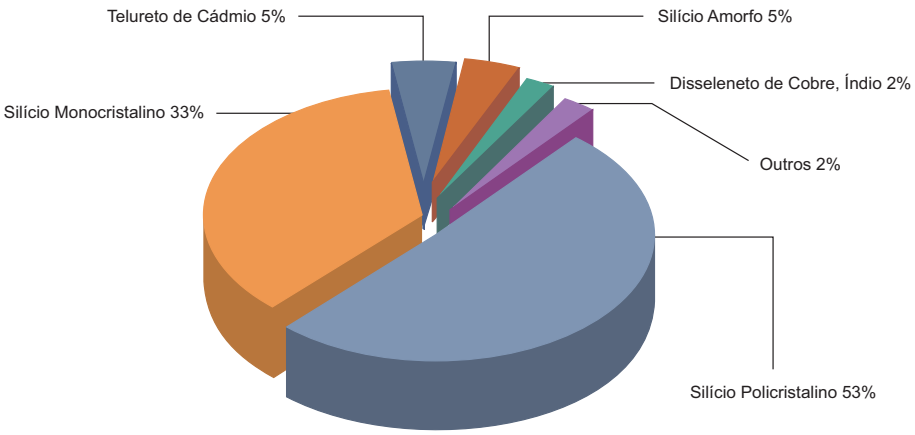


Figura 3.2
Mundo: distribuição das tecnologias de células FV, 2010 (em % da produção)

Fonte: Elaborado a partir de Photon International (2011).

Tabela 3.1 - Eficiência das células fotovoltaicas em estágios comerciais por tipo de tecnologia

Alternativa tecnológica	Tipo de células FV	Eficiência da célula (%)
Silício cristalino	Monocristalino	16% a 22%
	Policristalino	14% a 18%
Filmes finos	Disselenato de cobre, índio	7% a 12%
	Telureto de cádmio	10% a 11%
	Silício amorfo	4% a 8%

Fonte: EPIA (2011, p. 25).

Independentemente da origem da célula fotovoltaica, a cadeia prossegue com o agrupamento das células em módulos que, acoplados a suportes (móveis ou não)[16] e montados em uma sorte de equipamentos de ligação e controle (inversores, controladores de carga etc.), permitem que a energia gerada seja distribuída e/ou armazenada, tornando-se apta para o consumo final. Tais módulos podem ter tamanhos diversos, com graus distintos de eficiência, podendo ser, por sua vez, agrupados em grandes parques (usinas) solares ou ainda instalados de forma fracionada em telhados de residências ou edifícios, por exemplo.

No primeiro caso (usinas solares), os módulos são ligados diretamente à rede de distribuição de energia, dispensando o uso de baterias para a armazenagem. No caso dos módulos fracionados, estes podem ou não ser ligados à rede. Se forem isolados, são necessários sistemas

16. Suportes motrizes deslocam a posição dos painéis ao longo dia, buscando o melhor ângulo de incidência e, portanto, a máxima insolação possível. O uso de suportes motrizes tem sido uma tendência importante em parques solares de maior porte.

de armazenagem (em geral, baterias recarregáveis) para contrabalançar a intermitência diária da geração de energia. Quando ligados à rede, os módulos fracionados (residenciais ou em estabelecimentos comerciais) devem participar de algum tipo de regulação tarifária. A mais comum, tipo *feed in*, indica que o produtor residencial/comercial "vende" à rede toda a energia gerada durante o dia (em geral, por uma tarifa mais cara) e compra toda a energia consumida pagando sua tarifa residencial normal.

Neste caso, é preciso haver controles inteligentes (equipamentos de *smart grid*) que promovam uma medição líquida (*net metering*) da unidade consumidora/produtora ligada à rede. A "remuneração" do consumidor/produtor fracionado, originada na diferença positiva entre a energia "vendida" e a adquirida, o incentivaria a adquirir e amortizar os equipamentos solares. Note que, neste caso, deve haver não apenas um marco regulatório adequado, mas algum grau de incentivo fiscal e tributário que possa financiar o diferencial tarifário e/ou a amortização dos equipamentos, cujos preços são cadentes, mas ainda elevados. Em todos os países que ampliaram a participação da energia solar em suas matrizes, ocorreu justamente algum tipo de arranjo político, regulatório e fiscal/tributário que incentivou o consumo residencial/comercial de equipamentos fotovoltaicos.[17]

17. Os casos mais evidentes deste processo de desenvolvimento do setor a partir de políticas públicas (*policy-driven*) estão na Europa, com destaque para a Alemanha, Espanha e Itália, três dos quatro maiores mercados mundiais, e todos com regulação de tarifas *feed in*. Ver EPIA (2011).

Esta cadeia produtiva é bastante heterogênea, apresentando, portanto, estruturas competitivas múltiplas. A produção de silício grau solar, por exemplo, é dominada por um conjunto pequeno de empresas no mundo, muitas delas de elevado porte e atuação global. Não por acaso, é aqui que ocorre a maior agregação de valor (ver **Tabela 3.2**).

A produção de wafers e células é mais desconcentrada, mas ainda persistem grandes empresas, muitas delas operando a jusante na cadeia, isto é, produzindo também silício cristalino (por exemplo, Sharp, Sanyo).

Tabela 3.2 - Preços de produtos da cadeia fotovoltaica nos EUA (exceto quando indicado), dezembro de 2011

Etapa da cadeia	Unidade	US$
Silício grau metalúrgico (China)	US$/kg	2,60
Silício grau solar	US$/kg	31,80
Wafer monocristalino	US$/unidade (156 mm x 156 mm)	1,14
Célula monocristalina	US$/unidade (156 mm x 156 mm)	2,36
Célula fotovoltaica	US$/W	0,51
Módulo fotovoltaico (cristalino)	US$/W	0,98
Módulo fotovoltaico (filme fino)	US$/W	0,78

Fonte: Metal Prices e PV Insights.

A produção de módulos é muito mais desconcentrada em termos mundiais. Enquanto menos de 240 empresas produzem células fotovoltaicas no mundo, existem quase 1.000 empresas produtoras de módulos (ver **Figura 3.3** a seguir). Aqui, o porte das empresas é bem menor, assim como as margens de lucro praticadas. Ou seja, de maneira geral, a partir do elo de produção de silício cristalino, o avanço a jusante na cadeia revela um menor poder de barganha das empresas atuantes. Nestes casos, a concorrência é mais em preço do que em domínio da tecnologia e reputação, como é no caso da produção de silício.

No caso dos produtores de equipamentos de suporte e controle, vigora uma grande heterogeneidade: milhares de empresas atuantes de diversos portes. A exceção são os produtores de inversores solares, segmento dominado por grandes empresas produtoras de equipamentos elétricos (por exemplo, Siemens). Estima-se que 40% dos custos de instalação de um sistema fotovoltaico sejam compostos pelos equipamentos de ligação, controle e armazenagem, com destaque para os inversores, além dos custos de mão de obra da instalação.

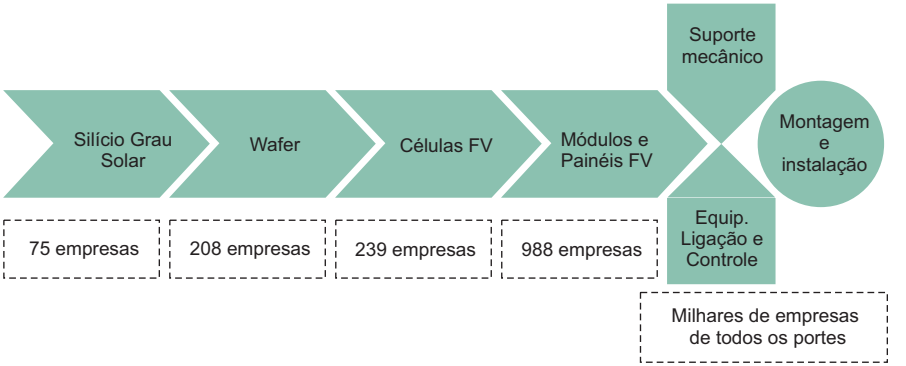
De fato, as empresas de montagem e instalação tendem a ser pequenas e médias empresas de serviços especializados, de base regional. Há, porém, casos de verticalização também neste elo – as empresas produtoras de módulos podem instalar os sistemas fotovoltaicos. Isto será tão mais comum quanto maior for a capacidade do sistema fotovoltaico instalado. Por exemplo, no caso de parques (usinas solares de mais de 1 MW) solares, a planta é diretamente implantada no sistema de *turnkey*

pela produtora dos equipamentos ou, ao menos, por empresas integradoras do tipo EPC (*Engineering, Procurement and Construction)*.

A figura abaixo sintetiza as informações sobre a estrutura competitiva da cadeia de equipamentos fotovoltaicos.

Figura 3.3
Estrutura empresarial por elo da cadeia de equipamentos fotovoltaicos no mundo (número de empresas), 2009

Fonte: elaboração própria a partir de CTI (2011).



Por fim, outra maneira de perceber a heterogeneidade da cadeia é observando a **Tabela 3.3** abaixo. Pode-se perceber que as barreiras à entrada, medidas apenas pelas necessidades de capital, para a produção de silício cristalino são bem maiores do que para a produção de módulos. O mesmo vale para os *wafers,* cuja instalação também é mais custosa que a do elo imediatamente a jusante, a saber, a produção de células.

Tabela 3.3 - Custos de capital para a instalação de plantas produtivas de escala economicamente viável, por elo da cadeia fotovoltaica, 2008 (em US$ milhões)

Linha de montagem	Capacidade (MW)	Custo (US$ milhões)
Silício grau solar	500	250
Wafer	50	40
Células	25	15
Módulos	10	2

Fonte: SPIRE Corporation apud CTI (2011).

De qualquer forma, a efervescência da demanda por equipamentos para a energia fotovoltaica tem redefinido a estrutura da oferta mundial. A próxima subseção trata justamente da estrutura da oferta no mundo, a partir da análise da produção de células fotovoltaicas.

3.1.2. Estrutura da oferta mundial

O desenvolvimento da cadeia de equipamentos para energia fotovoltaica sofre forte influência das políticas públicas. Desde meados da primeira década do século XXI, a demanda por sistemas fotovoltaicos cresceu a uma taxa muito expressiva. Entre 2006 e 2010, a capacidade instalada mundial cresceu a taxas pouco superiores a 54% ao ano, saltando de sete GW em 2006 para quase 40 GW instalados em 2010 (ver **Tabela 3.4**).

Tabela 3.4 - Mundo e países selecionados: capacidade instalada de geração de energia fotovoltaica, 2006 e 2010 (em MW)

País	2006	2010
Alemanha	2.900	17.300
Espanha	200	3.800
Japão	1.700	3.600
Itália	50	3.500
EUA	600	2.500
Rep. Tcheca	–	2.000
França	30	1.000
China	80	900
Bélgica	–	800
Coreia do Sul	30	700
Demais	1.400	3.600
Total	6.990	39.710

Fonte: REN21 (2011).

Novamente, destacam-se justamente os países que, ao longo dos anos 2000, introduziram diversas ações regulatórias e de incentivos fiscais e tributários para estimular o desenvolvimento da oferta de energia solar. Os casos mais claros são das políticas de preços diferenciados para as tarifas *feed in*, isto é, aquela em que o produtor de energia solar recebe um valor mais alto pela energia "vendida" para a rede do que aquele que ele paga para consumir eletricidade do grid. A diferença positiva contribuiria para um *payback* acelerado do sistema fotovoltaico instalado.[18]

O crescimento da demanda, cujo principal *driver* foi realmente a mudança da política pública, produziu um impacto imediato na oferta

18.Ver EPIA (2011, p. 46 e seguintes) para obter uma descrição aprofundada das políticas de apoio à energia solar nos países que foram bem-sucedidos na expansão do uso da energia solar.

de células fotovoltaicas. De fato, a produção de células fotovoltaicas cresceu 56% ao ano entre 1999 e 2010, com grande parte desse crescimento concentrado a partir de 2005 (entre 2005 e 2010, a taxa de crescimento anual passou para 72%). Em 2010, foram produzidos mais de 27 GW em células fotovoltaicas, mais do que o dobro do ano de 2009 (ver **Figura 3.4**).

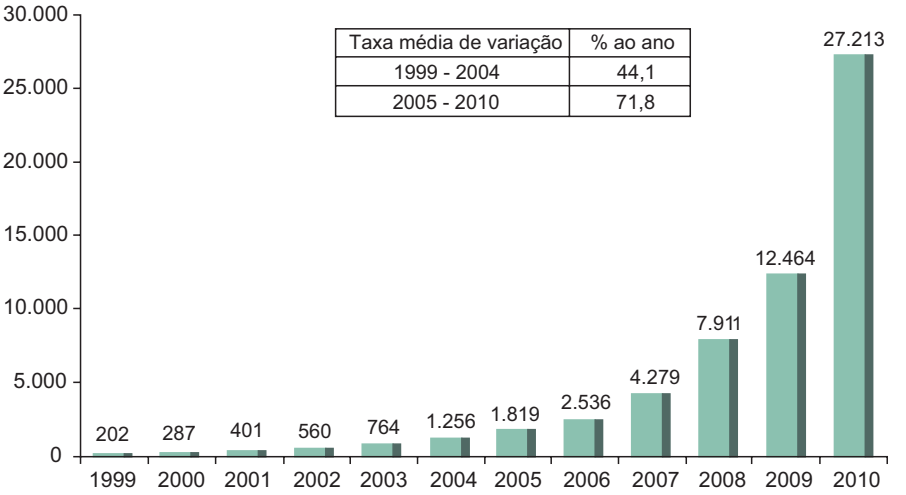


Figura 3.4
Produção mundial de células fotovoltaicas, 1999-2010 (em MW)

Fonte: elaborado a partir do Photon International (2011).

Como em outros segmentos industriais, a dinâmica da indústria mundial de equipamentos fotovoltaicos foi comandada pelo lócus de produção asiático. E também neste caso, mais uma vez a China vem destacando-se como maior produtor mundial. Quase metade de toda a produção mundial de células fotovoltaicas foi realizada na China em 2010.

A Alemanha, com 9,4%, e os Estados Unidos, com 4,5%, são também importantes fabricantes, mas ficam muito aquém da região asiática, com destaque para a China e Taiwan (ver **Tabela 3.5**).

Tabela 3.5 - Produção de células fotovoltaicas por países, 2010 (em MW e %)

País	Região	MW	%
China	China	13.019	47,3
Taiwan	Ásia	3.391	12,3
Alemanha	Europa	2.591	9,4
Japão	Ásia	2.291	8,3
Malásia	Ásia	1.886	6,8
EUA	EUA	1.253	4,5
Coreia do Sul	Ásia	865	3,1
Filipinas	Ásia	558	2,0
Índia	Ásia	470	1,7
Cingapura	Ásia	300	1,1
Noruega	Europa	215	0,8
Espanha	Europa	188	0,7
Itália	Europa	147	0,5
Holanda	Europa	110	0,4
Bélgica	Europa	79	0,3
Grécia	Europa	72	0,3
França	Europa	58	0,2
Suíça	Europa	25	0,1
Tailândia	Ásia	14	0,1
Portugal	Europa	5	0,0
Total geral		27.535	100,0

Fonte: elaborado a partir de Photon International (2011).

A concentração da produção na Ásia obedece ao padrão de distribuição geográfica da produção de componentes eletrônicos. Como foi observado, a produção de silício grau solar e grau eletrônico pode partilhar de economias de escala e escopo, o que torna a produção a jusante de *wafers* e células quase um imperativo para os líderes em silício purificado no mundo, localizados justamente na Ásia. Além disto, a rápida absorção da tecnologia pelas empresas chinesas e a expansão da oferta podem ser creditadas:

- Às políticas de controle do capital estrangeiro, que permitem a cessão de tecnologia;
- Às políticas de desenvolvimento tecnológico e de financiamento produtivo do governo chinês, que rapidamente se aproveitaram do *boom* da demanda, em especial na Europa;
- Á capacidade de incorporar conhecimento (*learn by doing*) em firmas que haviam sido subcontratadas pelas empresas japonesas desde o final dos anos 1990.

Não é à toa, portanto, que quatro das seis maiores empresas produtoras de células fotovoltaicas mundiais sejam chinesas. Juntas, essas empresas faturaram mais de US$ 8,4 bilhões em 2010 e produziram cinco mil MW em células fotovoltaicas ou quase 19% do total mundial (ver **Tabela 3.6**). Mesmo a empresa líder dos EUA, First Solar, tem grande parte de sua produção concentrada na Ásia (em especial na Malásia), o que reforça ainda mais a tendência de concentração geográfica da produção de células fotovoltaicas.

Tabela 3.6 - Maiores empresas mundiais de células fotovoltaicas, 2009-2010

Empresa	Origem do capital	Faturamento	Produção (MW)		Share (%)	
		(US$ milhões)	2010	2009	2010	2009
Suntech Power	China	2.902	1.585	704	5,8	5,6
JA Solar	China	1.769	1.463	520	5,4	4,2
First Solar	EUA	2.564	1.412	1.100	5,2	8,8
Trina	China	1.858	1.050	399	3,9	3,2
Q-Cells	Alemanha	1.813	1.014	586	3,7	4,7
Yingli	China	1.894	980	525	3,6	4,2
Motech	Taiwan	1.335	945	360	3,5	2,9
Sharp	Japão	1.708	910	595	3,3	4,8
Gintech	Taiwan	966	827	368	3,0	3,0
Kyocera	Japão	n/a	650	400	2,4	3,2
Top 10			10.836	5.557	39,8	44,6
Total Mundial			27.213	12.464	100,0	100,0

Nota: n/a – não disponível. Fonte: elaborado a partir de Photon International (2011) e relatórios das empresas.

Por fim, vale ressaltar que a escala de produção mundial foi ampliada, com investimentos em expansão de plantas e internacionalização de empresas. Como era de se esperar, a queda de preços dos sistemas fotovoltaicos foi bastante expressiva: apenas entre dezembro de 2011 e dezembro de 2010, os preços no varejo de módulos fotovoltaicos caíram 30% (Solar Buzz, 2011). A título de comparação, nesse mesmo período, os demais equipamentos integrantes do sistema de energia solar permaneceram praticamente inalterados (ver **Tabela 3.7**).

Tabela 3.7 - Países selecionados: preços* de equipamentos para sistemas fotovoltaicos, 2010 e 2011

	Unidade	2010	2011	D %
Módulo fotovoltaico	US$/Wp	3,47	2,43	-30,0
Inversor	US$/W contínuo	0,715	0,713	-0,3
Bateria	US$/W hora	0,21	0,213	1,4
Controlador de carga	US$/Amp	5,87	5,93	1,0

Nota: (*) dados de dezembro de 2011. Fonte: Solarbuzz (2011).

3.1.3. Estrutura da oferta no Brasil

A estrutura da oferta de equipamentos fotovoltaicos no Brasil é tão incipiente e diminuto quanto à demanda atual. De acordo com os dados do Banco de Informações de Geração da ANEEL, existem apenas seis usinas fotovoltaicas em operação, sendo que apenas uma delas tem propósitos comerciais, localizada em Tauá – CE (ver **Tabela 3.8**). Há diversos planos de crescimento (por exemplo, a própria expansão da planta de Tauá ou ainda a planta de 3 MW em construção em parceria entre a Cemig e a Solaria), mas a pequena demanda por módulos fotovoltaicos está concentrada em pequenos sistemas residenciais, comerciais e isolados. Há ainda a promessa de uma demanda premente para a utilização de módulos fotovoltaicos na expansão de aeroportos e em alguns dos estádios para a copa do mundo de 2014.

Tabela 3.8 - Usinas solares operando no Brasil*

Usina	UF	Potência outorgada (kW)	Potência fiscalizada (kW)
Araras - RO	RO	20,48	20,48
Tauá	CE	5.000,00	1.000,00
IEE	SP	12,26	12,26
UFV IEE/Estacionamento	SP	3,00	3,00
Embaixada italiana - Brasília	DF	50,00	50,00
PV Beta Test Site	SP	1,70	1,70
Total		5.087,44	1.087,44

Nota: (*) em dezembro de 2011. Fonte: BIG ANEEL (2011).

Mesmo com este potencial, é importante ressaltar que o mercado brasileiro não justifica a produção de nenhum elo da cadeia produtiva, ainda que sejamos o maior produtor mundial de silício grau metalúrgico. Até 2011, toda a demanda foi atendida por células e módulos fotovoltaicos importados, e mesmo assim, numa escala bastante limitada. De fato, entre 2000 e 2010, o Brasil importou um total de apenas US$ 38 milhões, representando a oferta acumulada para toda a última década (ver **Figura 3.5**).

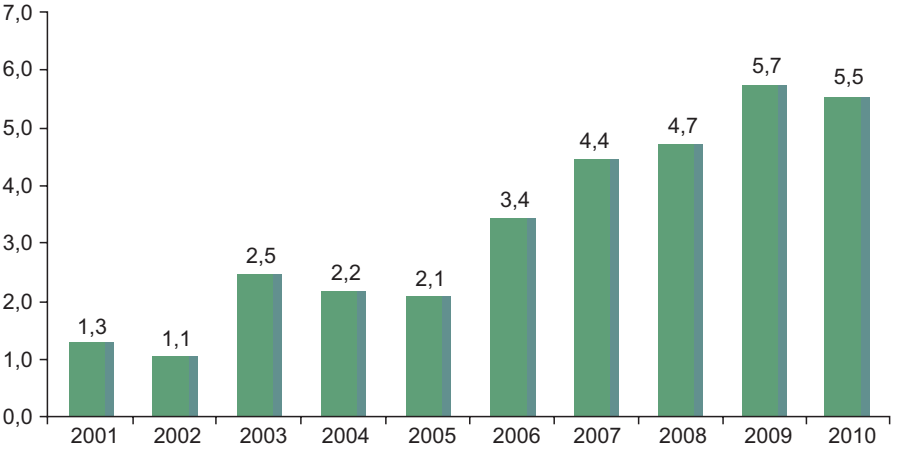


Figura 3.5
Importações de células e módulos fotovoltaicos, Brasil, 2001-2010 (em US$ milhões)

Fonte: elaborado por NEIT-IE-UNICAMP, com base nos dados da SECEX.

A maior parte destas importações vem da Ásia, sendo 35% do Japão e 28% da China (ver **Figura 3.6** abaixo). A liderança do Japão pode ser explicada pela origem da empresa Kyocera, uma das maiores

produtoras mundiais e a líder em vendas no Brasil. Tal liderança (estima-se algo como 75% do total) deve-se não apenas pela montagem da rede distribuição e instalação no Brasil, mas porque também é a principal fornecedora da usina de Tauá, que demandou em 2010 cerca de 4.000 painéis solares.

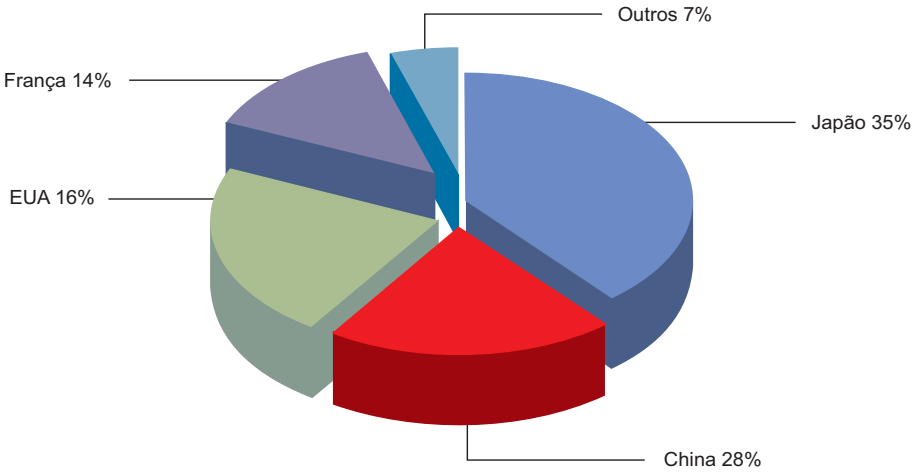


Figura 3.6
Distribuição geográfica da importação de células e módulos fotovoltaicos, 2010

Fonte: elaborado por NEIT-IE/UNICAMP, com base nos dados da SECEX.

De qualquer forma, estima-se que o atual mercado brasileiro de células e módulos fotovoltaicos seja entre três e quatro MW,[19] quase todos para aplicações *off grid*. Atualmente, como já foi observado, esta demanda vinha sendo atendida por importações.

Em 2011, a empresa Tecnometal inaugurou uma linha de montagem para a produção de módulos fotovoltaicos com capacidade de 20 MW/ano. A empresa opera com um elevado conteúdo importado, uma vez que todas as células continuam a ser importadas. Mesmo assim, a empresa pretende investir na verticalização a montante, uma vez que tem desenvolvido ações para produzir células e *wafers*.

Vale ressaltar que as empresas RIMA e Minasligas (numa parceria entre o BNDES e o IPT), atuantes no setor metalúrgico, também têm desenvolvido ações de P&D&I para a produção de silício grau solar a partir da rota metalúrgica.

A despeito da ainda baixa escala do mercado nacional,[20] é evidente o imenso potencial que o país oferece para o crescimento da energia solar. Os índices de insolação são os maiores do mundo e a disponibilidade de

19. Estimativas de mercado, compiladas a partir de entrevistas de campo. Não há dados precisos sobre a capacidade instalada total dos geradores fotovoltaicos, dado que o grosso da oferta está concentrada em unidades isoladas.

20. Na próxima seção, serão analisadas com detalhes as oportunidades para a expansão do segmento produtor de equipamentos fotovoltaicos no Brasil.

terras torna a possibilidade de expansão fotovoltaica bastante provável e mesmo desejável como fonte complementar na matriz energética. Tal potencial pode não se concretizar na próxima década, mas certamente em 20 ou 30 anos poderemos ter parques solares de grande porte no Brasil.

Além disto, há um potencial imediato no que se refere aos sistemas isolados da rede de distribuição, de modo a substituir/complementar os grupos geradores a diesel que, por serem mais caros, já tornam o custo da energia solar competitivo. E mais ainda, há um potencial futuro não desprezível, mas ainda incerto por conta da indefinição de um marco regulatório favorável, de instalação de sistemas residenciais/comerciais com tarifas *feed in*. Em qualquer caso, no entanto, a oferta de equipamentos produzidos no Brasil (substituindo as importações) só poderia ocorrer através de políticas de apoio (incentivos fiscais e tributários, e exigências regulatórias – poder de compra) e políticas de proteção, lançando mão dos argumentos da indústria nascente. Sem isto, é impossível suplantar a capacidade competitiva asiática onde, graças a elevadas economias de escala e domínio da tecnologia de produção de *wafers* e células, operam as empresas líderes mundiais.

A efetivação do potencial da energia solar no Brasil depende fortemente de políticas públicas de apoio. O aproveitamento dessa demanda *policy-driven* pela produção nacional de equipamentos fotovoltaicos só poderá ocorrer se essa mesma política contemplar também a preferência pelos equipamentos aqui produzidos.

3.2. Equipamentos para energia eólica

O segmento de bens de capital para a geração de energia eólica passa por um momento de franca expansão e perspectivas de crescimento continuado para os próximos anos, tanto no mercado mundial quanto no brasileiro. Esse quadro promissor resulta de uma conjunção de fatores que se reforçam em um ciclo virtuoso graças aos aspectos tecnológicos, que ampliam continuamente a eficiência dos aerogeradores, regulatórios/institucionais relacionados à implementação de políticas de fomento à geração de energia limpa e, finalmente, concorrenciais relacionados ao acirramento das pressões competitivas no mercado fornecedor de equipamentos voltados à geração de energia eólica.

A expansão da capacidade instalada de geração de energia eólica no mundo tem apresentado uma trajetória exponencial (mais do que decuplicou na última década), ampliando vigorosamente as encomendas no setor produtor de bens de capital. A elevação dos níveis de produção da indústria resulta em efeitos relacionados aos ganhos de escala e promovem uma tendência de custos cadentes da energia gerada pelas novas instalações.

Como resultado, tem-se a crescente viabilidade econômica da energia eólica que progressivamente reduz a necessidade de subsídios governamentais para tornar a energia gerada a partir dessa fonte competitiva frente às demais fontes alternativas e, inclusive, passa a rivalizar em temos de custos com as fontes tradicionais (pequenas centrais hidrelétricas, sobretudo).

3.2.1. Características e tendências

Existe um padrão dominante de aerogerador (ou turbina eólica) caracterizado pela existência de um rotor composto por três pás (ou hélices) que faz girar um eixo horizontal perpendicular às pás.

Apesar de existir uma possibilidade de inovações disruptivas – por exemplo, *cluster* de torres mais baixas, usando configurações do tipo cardume (Dabiri, 2011) que possam superar essa configuração dominante (há configurações radicalmente distintas produzidas em escala experimental) –, o progresso tecnológico apresenta, nos últimos anos, um caráter incremental.

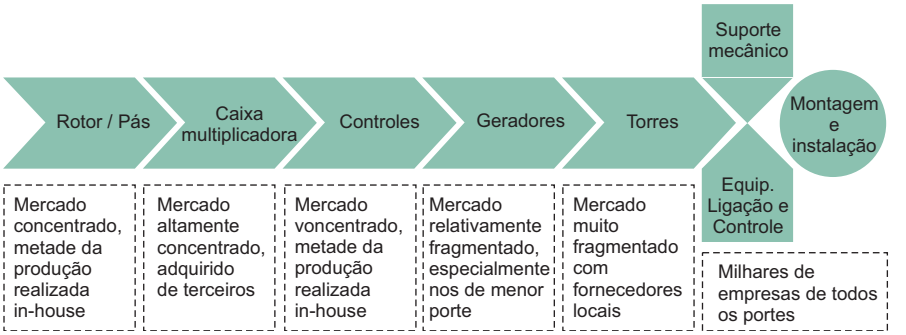
A evolução no setor tem caracterizado-se pelo progressivo aumento nas dimensões dos aerogeradores com a construção de sistemas dotados de torres mais altas e rotores com maior diâmetro. Uma ideia da evolução dos equipamentos pode ser apreendida se considerarmos que os geradores desenvolvidos até meados dos anos 1980 tinham torres com menos de 15 m de altura e que atualmente esses equipamentos superam os 100 m (126 m em 2010).

A construção de aerogeradores maiores, capazes de resistir às condições meteorológicas mais adversas, impõe grandes desafios ao processo manufatureiro ao empregar materiais leves e resistentes. No caso na produção das pás, há a necessidade de um cuidadoso balanceamento do peso para não comprometer a estabilidade de toda a estrutura.

A estrutura produtiva do setor é caracterizada pela heterogeneidade, com a presença de empresas operando com distintos níveis de integração vertical dos diversos elos da cadeia produtiva. Há empresas com estratégias de internalizar (inclusive por meio da aquisição de outras empresas fornecedoras de partes) a produção das três partes principais (nacele, pás e torre), tais como a alemã Enercon e a indiana Suzlon, que inclusive gerenciam e operam usinas geradoras de energia. Há outras, como, por exemplo, a estadunidense GE, que optam por adquirir de fornecedores especializados a maior parte dos componentes.

Figura 3.7
A cadeia simplificada de equipamentos aerogeradores

Fonte: elaboração própria com base em WindFacts (2009).



O processo de manufatura das pás depende de um conteúdo sofisticado em *design* e é intensivo em trabalho nas tarefas de incorporação de várias camadas sucessivas de resina, fibra de vidro e tecidos, bem como no acabamento com polimento e pintura. Cerca de metade da produção de pás é desenvolvida internamente pelos grandes fabricantes de aerogeradores.

A maior parte dos aerogeradores é dotada de uma caixa multiplicadora que tem a função de elevar a velocidade de rotação do eixo diretamente ao rotor para transmiti-la ao gerador. No entanto, a evolução tecnológica tem avançado em direção aos geradores que prescindem dessa caixa multiplicadora e operam em velocidades menores. Esse avanço resulta normalmente em um menor desgaste de peças e, por consequência, menores de custos relacionados à manutenção.

A estrutura dos aerogeradores guarda um significativo conjunto de sistemas embarcados de controle. Componentes microeletrônicos e de *software* são necessários para maximizar os resultados na geração de

energia e segurança do equipamento. Os sensores que indicam a direção e a velocidade dos ventos determinam o posicionamento do rotor, que deve estar sempre posicionado de frente para a o vento (controle *yaw*). Complementarmente, ocorre o ajuste do ângulo de ataque das pás, que se dá regulando a inclinação das pás (*pitch* e *stall*) que giram em torno do próprio eixo para manter a velocidade de rotação dentro dos limites de segurança e geração nominal do aparelho.

Há um grande número de fornecedores de geradores de menor porte (até 1 MW de potência), mas o mercado é mais concentrado entre os ofertantes de geradores de maior porte, inclusive de componentes mais críticos (tais como rolamentos).

As torres são usualmente construídas em aço ou concreto, normalmente transportadas em módulos. Algumas torres contam com sistemas de elevadores. A maioria dos fabricantes de aerogeradores opta por encomendar essas torres de fornecedores locais. Esse é certamente o elo tecnologicamente menos sofisticado da cadeia e que possui a estrutura de oferta menos concentrada e menores barreiras à entrada.

3.2.2. Estrutura da oferta mundial

Conforme já mencionado, a expansão da energia eólica destaca-se no período recente entre as fontes alternativas de energia, uma vez que se viabiliza crescentemente frente às formas tradicionais baseadas na queima de combustíveis fósseis, ampliando sua participação nas diversas matrizes energéticas nacionais.

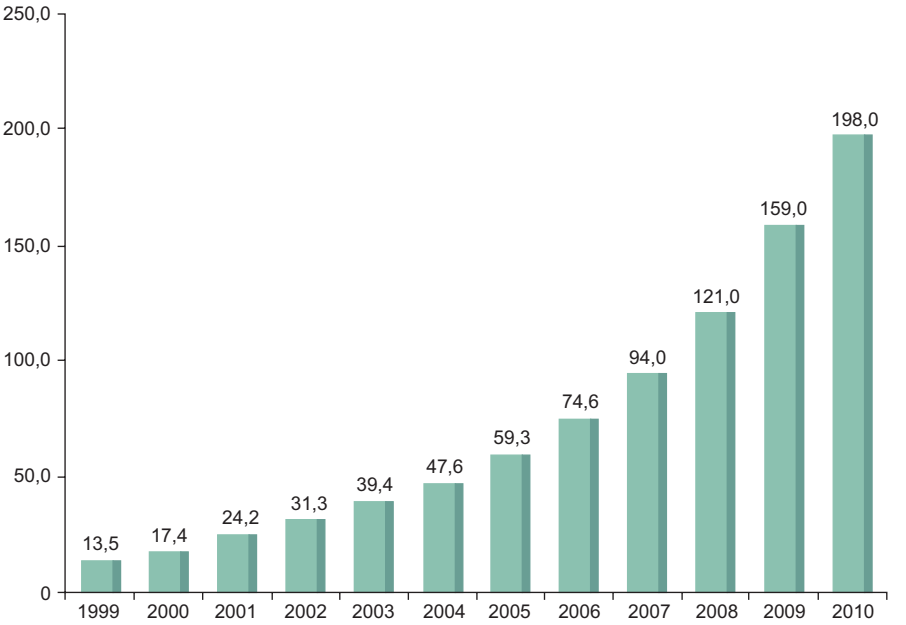
A evolução da produção de bens de capital para a essa fonte de energia tem sido estimulada diante do quadro de crescimento quase exponencial da capacidade instalada nas usinas de geração de energia elétrica de fonte eólica nos últimos anos (25% a.a. no período de 2005 – 2010), como na **Figura 3.8**.

O ano de 2010 se destaca pela participação majoritária dos países de economias emergentes (graças, sobretudo, ao desempenho chinês e secundariamente, ao indiano) no crescimento da oferta de energia eólica, superando inclusive os tradicionais países detentores de tal tecnologia – Estados Unidos e países europeus. Este fenômeno evidencia a importância

crescente dessa tecnologia nas estratégias de diversificação da matriz energética para ampliar a segurança de abastecimento face ao rápido crescimento da demanda e aliviar os custos e as incertezas relacionadas à importação de combustíveis fósseis a preços voláteis.

Figura 3.8
Evolução da capacidade de geração de energia eólica no mundo, 1999-2010 (em GW)

Fonte: REN 21 (2011).



A **Figura 3.9** permite identificar que há no período mais recente um arrefecimento dos investimentos em nova capacidade nas economias centrais, relacionadas aos efeitos da crise financeira internacional, ao passo que a Ásia (sobretudo a China e a Índia) expande fortemente os investimentos.

O gráfico seguinte indica ainda que os investimentos voltados à geração de energia de fonte eólica e, por consequência, a demanda por bens de capitais associados encontram-se ainda muito concentrados no continente europeu, América do Norte e Ásia. Por meio da **Tabela 3.9** seguinte é possível verificar que os dez principais países respondiam por mais de 85% de toda a capacidade instalada no final do ano de 2010.

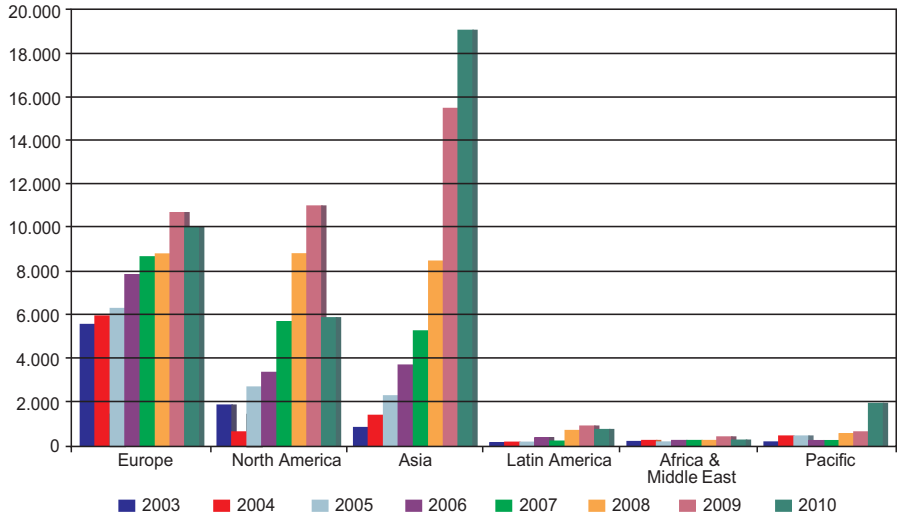


Figura 3.9
Distribuição geográfica da capacidade anual instalada de aerogeradores, mundo, 2003-2010 (em MW)

Fonte: Global Wind Report (2010).

Tabela 3.9 - Capacidade instalada de geração de energia eólica no final de 2010, mundo e países selecionados (em MW)

País	MW	Participação
China	44.733	22,7%
Estados Unidos	40.180	20,4%
Alemanha	27.214	13,8%
Espanha	20.676	10,5%
Índia	13.065	6,6%
Itália	5.797	2,9%
França	5.660	2,9%
Reino Unido	5.204	2,6%
Canadá	4.009	2,0%
Dinamarca	3.752	1,9%
Resto do mundo	26.749	13,6%
Total dos 10 mais	170.290	86,4%
Total mundo	197.039	100%

Fonte: Global Wind Report (2010).

No ano de 2010, a China assumiu, pela primeira vez, a liderança em capacidade instalada voltada à geração de energia elétrica de origem eólica. E essa posição foi conquistada por meio de investimentos que, naquele

ano, representaram cerca de metade de todos os aerogeradores instalados no mundo. A **Tabela 3.10** mostra a capacidade nova gerada a partir dos investimentos realizados no ano de 2010.

Tabela 3.10 - Incremento da capacidade instalada de geração de energia eólica no ano de 2010, mundo e países selecionados (em MW)

País	MW	Participação
China	18.928	49,5%
Estados Unidos	5.115	13,4%
Índia	2.139	5,6%
Espanha	1.516	4,0%
Alemanha	1.493	3,9%
França	1.086	2,8%
Reino Unido	962	2,5%
Itália	948	2,5%
Canadá	690	1,8%
Suécia	604	1,6%
Resto do mundo	4.785	12,5%
Total dos 10 mais	33.480	87,5%
Total mundo	38.265	100%

Fonte: Global Wind Report (2010).

Observa-se na tabela acima que a demanda por equipamentos voltados à energia eólica mantém-se concentrada em um conjunto restrito de nações, sendo que dez países responderam por 87,5% das instalações de aerogeradores no ano de 2010.

Assim como a demanda, que se concentra em um pequeno conjunto de mercados nacionais, a estrutura de mercado dos ofertantes de aerogeradores é também bastante concentrada no nível das empresas. A **Tabela 3.11** a seguir apresenta os principais *players* e o *market share* mundial.

Observa-se a partir da tabela acima a significativa presença de empresas oriundas das duas economias emergentes que mais ampliaram a capacidade instalada no período recente (China e Índia). Esta constatação sugere a importância da expansão do mercado doméstico como um elemento catalisador do fortalecimento de empresas de nacionais

voltadas a esse promissor mercado. Uma base nacional ampla de fornecedores e produtores que dominam o estado de arte do segmento é certamente um espaço privilegiado para o florescimento de capacitações tecnológicas, eficiência produtiva e ganhos de escala.

Tabela 3.11 - Principais ofertantes e *market share* no mercado mundial de aerogeradores

Empresa	Origem do capital	Faturamento (US$ milhões)	Vendas MW	Share %
Vestas	Dinamarca	9.262	5.832	14,8
Sinovel	China	3.100	4.374	11,1
GE Wind	EUA	nd	3.783	9,6
Goldwind	China	2.648	3.743	9,5
Enercon	Alemanha	nd	2.837	7,2
Suzlon	Índia	4.013	2.719	6,9
Dongfang	China	nd	2.640	6,7
Gamesa	Espanha	3.662	2.601	6,6
Siemens Wind Power	Dinamarca	nd	2.325	5,9
United Power	China	2.000	1.655	4,2
Top 10			32.508	82,5
Total Mundial			39.404	100,0

Nota: nd – dado não disponível

Fonte: elaborado a partir de BTM Consult apud REN21 (2011) e relatórios das empresas.

A política energética chinesa tem um compromisso claro de aproveitamento dos recursos eólicos do país, em parte impulsionada pela necessidade de ampliar a sua capacidade de geração de energia para alimentar uma economia em crescimento e estimular o desenvolvimento econômico.

O caso indiano também deve ser destacado. Em uma situação semelhante à da China, a Índia aposta no uso da energia eólica como uma estratégia de diversificação de sua matriz energética e também visa aproveitar a expansão mundial para a venda de equipamentos voltados à energia eólica. Atualmente, a Índia conta com um conjunto importante de empresas voltadas à produção de equipamentos eólicos, inclusive uma líder mundial, a Suzlon. A Índia já exporta uma parte expressiva de sua produção para países, tais como Estados Unidos, Europa, Austrália, China e Brasil.

A despeito da elevada concentração já existente na estrutura desse mercado, é possível perceber que as posições não estão solidificadas. O momento é de expansão acelerada e as oportunidades para o surgimento de novos *players* parecem consideráveis. O crescimento desse mercado nos últimos anos, bem como a perspectiva de continuidade dessa tendência no futuro, tem resultado no acirramento das pressões competitivas entre essas empresas, com desdobramentos em fluxos de comércio, fusões, aquisições e investimentos estrangeiros diretos, e redução nos custos das instalações.

3.2.3. Estrutura da oferta no Brasil

O Brasil representa um grande mercado potencial para os bens de capital voltados à geração de eletricidade a partir da energia eólica. O primeiro Atlas dos Ventos do Brasil, publicado em 2001, estimava que o potencial eólico seria de aproximadamente 143 GW. Ocorre que essa estimativa estava baseada nas dimensões dos aerogeradores com torres de cerca de 50 m de altura. Novas medições realizadas mais recentemente (2008 e 2009), considerando a construção de aerogeradores com torres de maior altura, apontam que o potencial brasileiro de geração a partir da energia eólica poderia superar 350 GW.

As melhores regiões brasileiras para a implantação de parques eólicos situam-se no litoral das regiões norte/nordeste, com especial destaque à costa dos Estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Pernambuco e Bahia. No sul brasileiro, também se encontra um bom potencial gerador nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

O aproveitamento de parte desse potencial foi estimulado a partir da criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFRA). Graças a esse programa, a capacidade instalada no Brasil apresenta um crescimento significativo a partir de 2006, conforme se verifica na **Figura 3.10**.

A expansão do mercado de aerogerados no Brasil tem atraído investimentos de grandes empresas estrangeiras no período recente. A estrutura de mercado evoluiu nos últimos cinco anos de um virtual monopólio comandado pela Wobben (grupo Enercon) para uma estrutura

de mercado mais fragmentada, com a presença de 11 empresas no final de 2011 (Valor Econômico, 26/10/2011).

Entre os fatores explicativos para esse intenso fluxo de investimentos no período recente, está o interesse despertado pelo dinamismo do mercado brasileiro, especialmente atrativo para as empresas estrangeiras que encontram um quadro de estagnação econômica nos seus mercados de origem (no caso das empresas estadunidenses e europeias). Esses seriam fatores determinantes para o início de operação no mercado brasileiro por parte das empresas, tais como a GE Wind (estadunidense), Siemens (alemã), Gamesa (espanhola) e Alston (francesa).

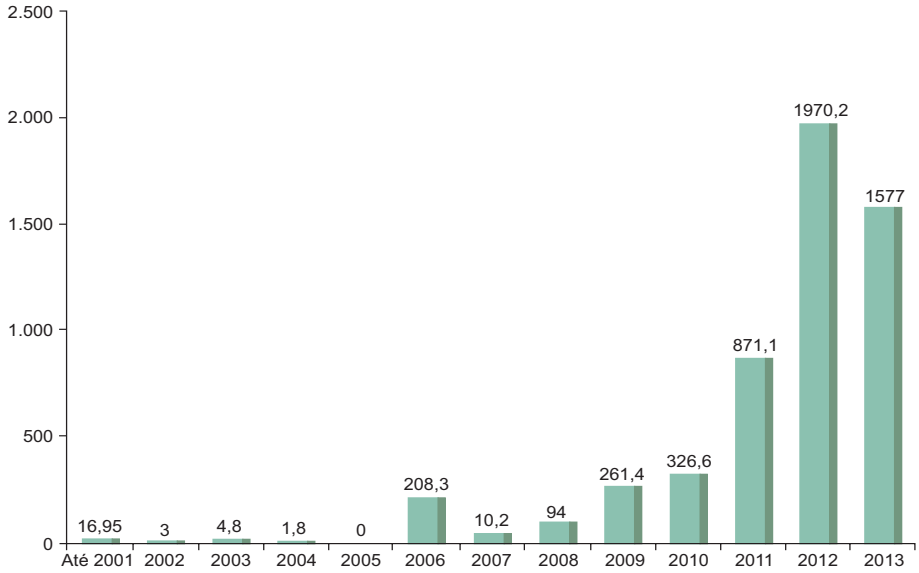


Figura 3.10
Expansão anual esperada da capacidade de geração de energia eólica no Brasil, 2001-2013 (em MW)

Fonte: elaboração própria com base nos dados da ABEEOLICA (2011).

Além do dinamismo do mercado doméstico brasileiro e as expectativas de expansão na capacidade nos próximos anos, existe o interesse dessas empresas em exportar uma parte significativa da produção para os países da região.

Há uma expectativa de acirramento ainda maior da concorrência no Brasil com a perspectiva da entrada de empresas chinesas no país. As chinesas Sinovel e Guodian United Power negociam sua entrada no mercado brasileiro de aerogeradores baratos e contam com um financiamento estatal no seu país de origem.

A Sinovel já tem seu primeiro contrato no país, com a Desenvix, e também tem planos de constituir uma planta produtiva no Brasil. A empresa está envolvida no projeto de Barra dos Coqueiros (com capacidade de 34,5 MW), em Sergipe, previsto para operar a partir de julho de 2012.

Em setembro de 2011, a United Power declarou sua intenção de investir cerca de US$ 100 milhões na construção de uma unidade produtiva no Brasil – sua primeira unidade fora da China – para atender todo o continente. Essa empresa, de capital estatal chinês, "é uma das cinco grandes chinesas de energia e tornou-se a décima maior fabricante de aerogeradores do mundo no ano passado, ao instalar 1.600 MW e abocanhar 4% da demanda global, segundo a BTM Consulting" (Valor Econômico, 28/10/2011).

Esta nova configuração da estrutura produtiva no Brasil, com a entrada de novos *players,* pode ser verificada no *market share* das empresas no final do ano de 2010 e na distribuição planejada para os projetos já aprovados para o ano de 2013, conforme a **Tabela 3.12** a seguir.

Tabela 3.12 - Capacidade de geração de energia eólica no Brasil por empresa

Empresa	Origem do capital	Capacidade instalada (em MW)	
		2010	Previsão 2013
Wobben/Enercon	Alemanha	415,8	969,8
Suzlon	Índia	385,0	725,4
IMPSA	Argentina	137,1	987,3
Vestas	Dinamarca	103,8	799,6
GE Wind	EUA	–	824,6
Siemens	Alemanha	–	168,2
Gamesa	Espanha	–	300,0
Alston	França	–	252,1

Fonte: ANEEL apud Brazil Wind Power (2011).

A evolução tecnológica dos aerogeradores e a maior pressão competitiva promoveu uma sensível redução nos custos da energia gerada a partir desta fonte, que passou de cerca de R$ 300 o kWh nos leilões do PROINFA de 2005 para R$ 120 em 2010 e R$ 99 em 2011. Os atuais

valores colocam a energia eólica como competitiva com relação às fontes mais tradicionais, tais como as térmicas a gás.

O potencial do setor é muito grande e poderá ser ampliado pelo mercado livre e pela autoprodução. Essa sensível redução nos preços da energia gerada a partir da fonte eólica tem atraído investimentos também de grandes empresas atuantes em setores eletrointensivos. Recentemente, foram anunciados investimentos de cerca de R$ 3,4 bilhões na construção de novos parques eólicos com capacidade para gerar até 1.000 megawatts (MW) de energia por parte de um grupo de seis empresas: Alcoa, Camargo Corrêa Cimentos, CSN, MPX, Vale e Votorantim (Valor Econômico, 6/10/2011).

Esses investimentos por parte dos autoprodutores são estimulados não apenas pelo barateamento dos custos da energia eólica, mas também pelas maiores facilidades associadas às exigências ambientais, quando comparadas com os processos para a aprovação da construção de usinas termoelétricas ou hidrelétricas.

A indústria brasileira de aerogeradores não conta com nenhuma produtora de capital nacional de sistemas completos (*turnkey*), mas há espaços (efetivos e potenciais) para as empresas voltadas aos componentes dos aerogeradores em todas as potências em uso no país, desde as empresas voltadas à produção das torres de concreto ou aço, fundições, geradores e material elétrico em geral até as pás.

Um exemplo de empresa nacional com estratégia de se integrar à cadeia produtiva dos aerogeradores é o da catarinense WEG, que anunciou recentemente a criação de uma *joint-venture* com a espanhola MTOI para a fabricação de aerogeradores no mercado brasileiro. O acordo da MTOI com a WEG resultará em uma empresa, com participação igualitária, voltada à fabricação, montagem, instalação e comercialização de aerogeradores e fornecimento de serviços de operação e manutenção no Brasil.

Outra empresa que merece destaque é a Tecsis, de capital 100% nacional, que se tornou um dos mais importantes *players* mundiais no segmento de pás para aerogeradores. A Tecsis é fornecedora de pás para grandes empresas estrangeiras, como o GE Wind, por exemplo, e tem a maior parte de sua produção exportada.

Por fim, vale ressaltar que essa indústria, instalada recentemente sob a égide do crescimento da demanda com redução dos custos e apoio de políticas públicas (marco regulatório, financiamento condicionado ao aumento de conteúdo nacional), conseguiu tornar-se competitiva em vários elos da cadeia. A presença das empresas líderes mundiais, que vêm instalando unidades produtivas no Brasil, contornou a deficiência competitiva pregressa e tem garantido um dinamismo que concilia o aumento da oferta, crescimento do conteúdo importado e redução dos preços, o que, por fim, reforça o aumento da demanda.

3.3. Equipamentos para energias renováveis "tradicionais"

Conforme foi anteriormente analisado, procurou-se dar um tratamento diferenciado para os equipamentos para as energias renováveis de fontes aqui definidas como "tradicionais". Tradicionais porque, apesar de renováveis, não são portadoras de inovações em ritmo tão intenso quanto os equipamentos para as energias solar e eólica. De fato, os equipamentos para biomassa, por exemplo, não diferem muito daqueles de usinas termoelétricas de pequeno e médio portes. O mesmo vale para os equipamentos para as pequenas centrais hidrelétricas (PCH) que, apesar do porte e da complexidade menores do que as turbinas e os geradores hidráulicos de grande porte, não são portadores de inovações.

É por esta razão, por exemplo, que há uma grande dificuldade em identificar os produtores de equipamentos para a geração de energia através de biomassa. O mais comum, por exemplo, é identificar os grandes integradores de equipamentos, isto é, as empresas que, detentoras de um projeto e da tecnologia do processo produtivo, instalam unidades fabris de cogeração, ou seja, plantas produtivas cujos subprodutos orgânicos – bagaço de cana, por exemplo – alimentam uma usina termoelétrica no mesmo complexo industrial.

Já no caso das PCHs, há uma miríade de pequenas e médias empresas fornecedoras de equipamentos de pequeno porte, sobretudo nas miniusinas hidrelétricas localizadas em estabelecimentos rurais. Já nas usinas que se aproximam do porte máximo das PCHs (30 MW de capacidade), disputam o mercado também as grandes empresas fornecedoras de grande porte, tais como a Voith Hidro.

Dada a profunda heterogeneidade dos segmentos, a dificuldade para a obtenção de dados desagregados e as especificidades do mercado brasileiro, optou-se aqui por apresentar brevemente as características econômicas do segmento e uma análise da estrutura de oferta no Brasil.

3.3.1. Biomassa

Em um conceito amplo, pode-se afirmar que a biomassa é a mais tradicional das fontes de energia. Como fonte primária de energia, pode-se considerar como biomassa a lenha empregada em qualquer processo de aquecimento ou cocção de alimentos e nesse conceito abrangente, a biomassa com grande relevância da matriz energética mundial, sobretudo nas sociedades menos desenvolvidas economicamente.

Aqui, apresentaremos considerações a partir de um recorte bem mais restrito da energia gerada a partir da biomassa: o interesse aqui está centrado na indústria de bens de capital voltada à geração de energia elétrica a partir da biomassa.

Alvim Filho (2009) classifica a biomassa a partir da origem do material empregado como fonte primária para a geração de energia:

Biomassa energética florestal: inclui basicamente a biomassa lenhosa (cultura ou extrativismo), associada normalmente à indústria de papel e celulose, serrarias etc.

Biomassa energética agrícola: relativa aos biocombustíveis oriundos do cultivo agrícola. Onde se classificariam a cana-de-açúcar, mamona, casca de arroz, capim, trigo etc.

Neste caso, o conteúdo energético é a celulose e a lignina contidas na matéria. A rota tecnológica mais comum para a obtenção de energia seria a combustão direta e a pirólise. Alternativas mais complexas tecnologicamente estariam associadas à produção de combustíveis líquidos e gasosos (licor negro e gaseificação de resíduos de madeira).

Rejeitos urbanos: mediante a utilização da biomassa presente em resíduos sólidos e líquidos urbanos (lixo e esgoto).

Nestes casos, ainda segundo Alvim Filho (2009), as "rotas tecnológicas de seu aproveitamento energético são a combustão direta, gaseificação, pela via termoquímica após a separação dos materiais recicláveis, e digestão anaeróbica, na produção de biogás, pela via biológica".

As diferentes rotas tecnológicas empregadas para a utilização da biomassa como fonte primária de energia pode ser visualizada na **Figura 3.11**.

A tecnologia predominante para a geração de eletricidade a partir da biomassa é ainda a conversão termoquímica por meio da **combustão direta** em caldeiras, em ciclos de vapor. No entanto, há a perspectiva de desenvolvimento tecnológico voltado à viabilização de técnicas mais complexas em escala industrial para a geração de energia elétrica a partir de equipamentos que promovam maior flexibilidade no emprego dos diferentes tipos de biomassa. Outro aspecto visado pelo progresso tecnológico no setor é a queima em associação a outros combustíveis, com a **combustão mista** (biomassa e carvão), **gaseificação** da biomassa e uso do gás em ciclos combinados.

Assim, pode-se afirmar que o processo predominante de aproveitamento da biomassa para a geração de energia elétrica pode ser enquadrado tecnicamente como um método de **conversão termelétrica**. Em função disso, os bens de capital empregados voltados à geração de eletricidade a partir da biomassa são semelhantes aos empregados nas usinas termoelétricas voltadas à queima de gás ou carvão.

A evolução tecnológica do setor tem também, progressivamente, ampliado a pressão dos sistemas de vapor, com a transição da produção baseada em baixa pressão (até 20 bars) para os sistemas de alta pressão (até 80 bars). Esse avanço é importante para viabilizar a passagem dos sistemas voltados à autossuficiência em energia elétrica em direção à geração de excedentes comercializáveis.

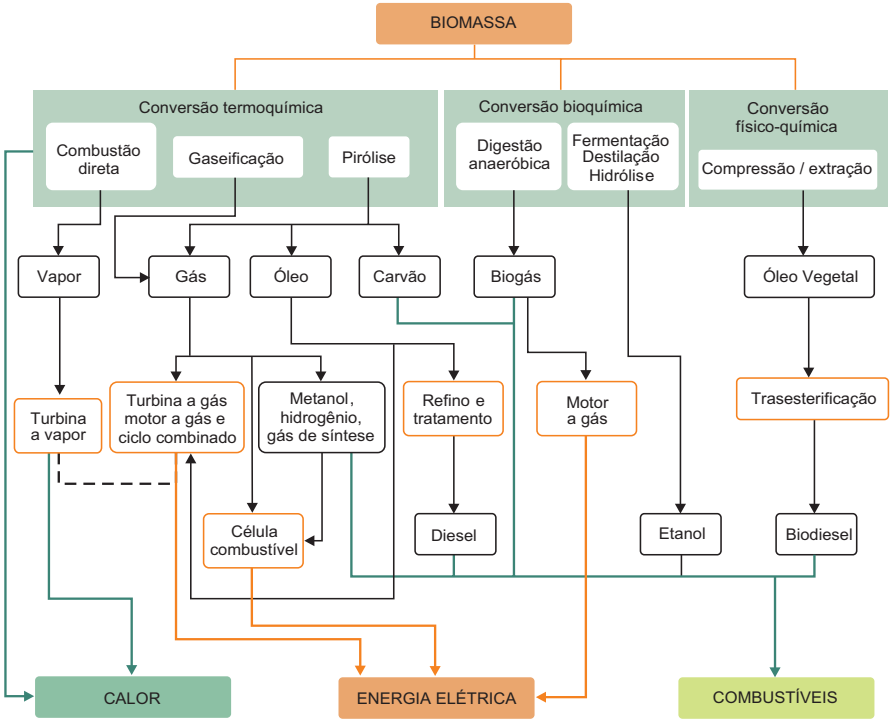


Figura 3.11
Rotas tecnológicas para a conversão da biomassa

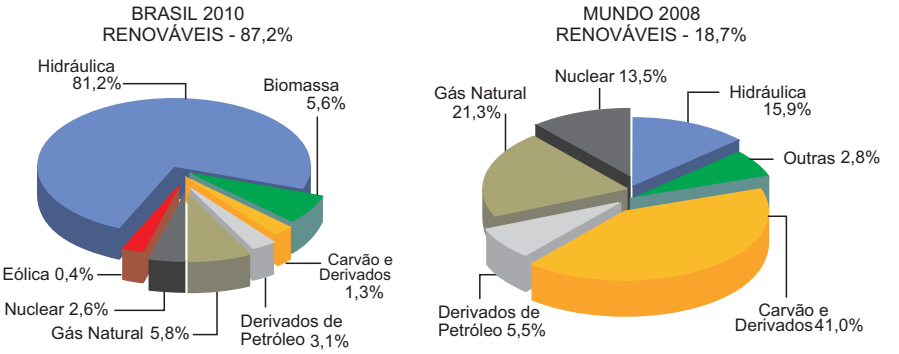
Fonte: Alvim Filho (2009).

3.3.1.1. Características e tendências: o mercado de bioeletricidade

O Brasil é um dos líderes mundiais na geração de eletricidade a partir da biomassa. O primeiro aspecto a se destacar é a já significativa dimensão do mercado brasileiro. Em grande medida, essa posição de destaque relaciona-se ao desenvolvimento do setor sucroalcooleiro que se traduz na posição de destaque do álcool combustível na matriz energética brasileira, onde os derivados da cana, incluindo o etanol, respondem por mais de 20% do total da energia produzida no país (EPE, 2010). Este aspecto é determinante do fato da energia elétrica a partir da biomassa responder por cerca de 5% da geração da energia elétrica nacional, enquanto essa fonte ocupa um espaço insignificante na média mundial, conforme se visualiza na **Figura 3.12**.

Figura 3.12
Fontes de geração de energia, Brasil e mundo

Fonte: EPE (2010) apud Tomalquisim (2011).



A projeção da evolução desse mercado nos próximos anos prevê ainda (EPE, 2010) que esta participação seguirá crescendo até alcançar 8,5% no ano de 2019. De acordo com essa projeção, a geração de energia por meio da biomassa responderia por cerca de 37% da expansão da energia em fontes renováveis no período entre 2009 e 2019. Esses números consideram que a geração de energia elétrica a partir de empreendimentos que empregam a biomassa com combustível deve passar de 5.380 MW, no ano de 2010, para 8.521 MW em 2019, o que representaria um incremento de 3.141 MW no período (crescimento de 58,4), conforme já exposto na **Tabela 3.13**, na seção anterior.

Conforme já argumentado, o desempenho destacado do Brasil na geração de eletricidade por esse meio resulta em grande medida do desenvolvimento anterior de outros setores produtivos, sobretudo, em função dos benefícios obtidos por meio dos arranjos de cogeração, em que a geração de energia elétrica se beneficia da significativa estrutura produtiva brasileira nos setores sucroalcooleiro, de papel e celulose.

Predominam no Brasil sistemas de queima direta operando em cogeração com as usinas de açúcar e álcool que, a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar, respondem a 80% de toda a eletricidade gerada a partir do processo de conversão termelétrico da biomassa, conforme se verifica na tabela abaixo.

A produção de energia elétrica a partir das plantas sucroalcooleiras é um tema antigo no Brasil, mas só encontrou um ambiente mais encorajador para se expandir a partir de mudanças no marco regulatório da primeira metade da década de 2000.

Tabela 3.13 - Capacidade instalada de usinas termoelétricas à biomassa, Brasil, 2011

Combustível	Potência fiscalizada		Nº de usinas
	MW	%	
Bagaço de cana de açúcar	6.907	80,0	340
Licor negro	1.245	14,4	14
Resíduos de madeira	328	3,8	38
Biogás	71	0,8	15
Capim elefante	32	0,4	2
Carvão vegetal	25	0,3	3
Casca de arroz	20	0,2	7
Óleo de palmiste	4	0,1	2
Total biomassa	8.633	100,0	421
% Biomassa no total UTE	28,1		28,4
% Biomassa no total geração do Brasil	7,4		16,8

Fonte: BIG-ANEEL.

A criação de uma demanda para a energia produzida a partir da biomassa e a possibilidade de comercializar o excedente produzido tiveram um importante papel estimulador ao avanço tecnológico nas usinas, que subaproveitavam o potencial energético do bagaço e da palha. A possibilidade de comercializar o excedente no mercado livre de energia tornou a geração de eletricidade, que era voltada majoritariamente ao consumo próprio, uma fonte importante de receita para as usinas, justificando a ampliação dos investimentos nos sistemas de geração de maior complexidade tecnológica e eficiência energética (conforme Olivério e Ferreira, 2010).

O setor de papel e celulose também tem participação importante por meio da queima do licor negro ou (lixívia negra é um fluido processual que resulta do processo de cozedura da madeira para retirar componentes indesejáveis ao processo de fabricação do papel, tais como lenhina, extrativos e cinzas) de cavacos e cascas de madeira. Por serem intensivas em energia, as empresas do setor produzem normalmente visando o próprio consumo.

Destaca-se também uma fonte de material para a queima relacionada ao biogás que, embora ainda pouco expressiva, tem potencial de crescimento com a perspectiva de aproveitamento de resíduos dos grandes centros urbanos.

Outros materiais contribuem marginalmente para a geração de energia termelétrica a partir da biomassa. O Brasil é pioneiro no emprego do capim como fonte de energia. Essa alternativa traz como vantagem a possibilidade de produção do material em terras de baixa qualidade.

Existe também um significativo mercado potencial mais fragmentado e heterogêneo caracterizado pela demanda em pequena escala por parte dos estabelecimentos rurais, instalações de tratamento de resíduos e esgoto urbano, que podem contribuir para a expansão do setor.

Outro vetor que continuará estimulando o setor nos próximos anos é a consolidação do mercado livre de energia, que abre oportunidades de ampliação das receitas das empresas por meio da comercialização da geração excedente de energia.

Complementarmente, medidas governamentais de fomento à geração de energia renovável também cumprem o papel de ampliar a atratividade desse mercado, como, por exemplo, um decreto recente por parte do governo do Estado de São Paulo (de 6 de junho de 2011) de isenção de Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) para os projetos de cogeração de energia (dando um tratamento isonômico ao da geração a partir da energia eólica).

Com essa medida, as usinas passam a ter total isenção do ICMS dos bens de capital que adquirirem para investir na cogeração de energia (anteriormente, a alíquota do ICMS paga sobre esses bens era de 12%).

Com essa medida, pretende-se ampliar os investimentos por parte das usinas de açúcar e álcool na geração de energia elétrica voltada à comercialização do excedente produzido.

> Das 432 usinas de cana em operação no país, 129 já exportam energia, segundo dados da União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA). Dessas, 70 estão no estado Estado de São Paulo. Apesar de o estado responder pela maior parte da safra nacional de cana-de-açúcar, as usinas são antigas e geralmente produzem energia apenas para o consumo próprio. Os usineiros reclamam que os preços pagos hoje pela energia não remuneram o investimento na troca dos equipamentos de cogeração. (Brasil Econômico, 06/07/2011)

A demanda futura também parece garantida pelas perspectivas de investimentos relativos ao leilão de energia A-5, realizado em 20 de dezembro de 2011.

Assim, conclui-se que a trajetória do setor para os próximos anos deve continuar apresentando uma demanda crescente no setor de bens de capital, com o aproveitamento de um razoável potencial de crescimento ainda inexplorado, em arranjos de cogeração, em especial nas usinas de açúcar e álcool, papel, celulose e outras.

Esse panorama indica um quadro promissor para as empresas brasileiras voltadas à produção de bens de capital para a geração de energia a partir da biomassa no futuro.

O Brasil conta com um conjunto de empresas produtoras de equipamentos voltados à geração de energia elétrica a partir da biomassa de todos os equipamentos e partes dos sistemas, controles lógicos e automação, inclusive empresas capazes de oferecer sistemas integrados na modalidade *turnkey* (**Tabela 3.14**).

do setor, capaz de fornecer soluções integradas e completas, e que tem feito esforços tecnológicos significativos nos últimos anos, inclusive em universidades e centros de pesquisa.

Tabela 3.14 - Empresas da IBKER segundo áreas e máquinas específicas

Bio/Térmica	Equipamentos gerais (inclusive plantas turnkey)	Dedini S/A Indústrias de Base
		Delp Engenharia Mecânica LTDA
		Equipalcool sistemas LTDA
		José Luiz Limana MEUSI - Usinas Sociais Inteligentes Destilarias Sustentáveis S/ABENECKE IRMÃOS & CIA. LTDA
	Bio/Térmica	Caldema Equipamentos Industriais LTDA
		Equipalcool Sistemas LTDA
		Leonil Indústria Mecatrônica LTDA
		Texas Turbinas a Vapor LTDA
		TGM Turbinas Indústria e Comércio LTDA

Fonte: Elaboração própria a partir de DATAMAQ – ABIMAQ.

Entre essas empresas, destaca-se a Dedini, que é a maior empresa No entanto, a despeito das perspectivas de crescimento do mercado de bens de capital voltados à geração de energia a partir do uso da biomassa, deve-se considerar que a atividade enfrenta alguns desafios no período recente, especialmente mediante a dificuldade em concorrer com os preços declinantes de outras fontes, especialmente a eólica, conforme se observa na **Figura 3.13**.

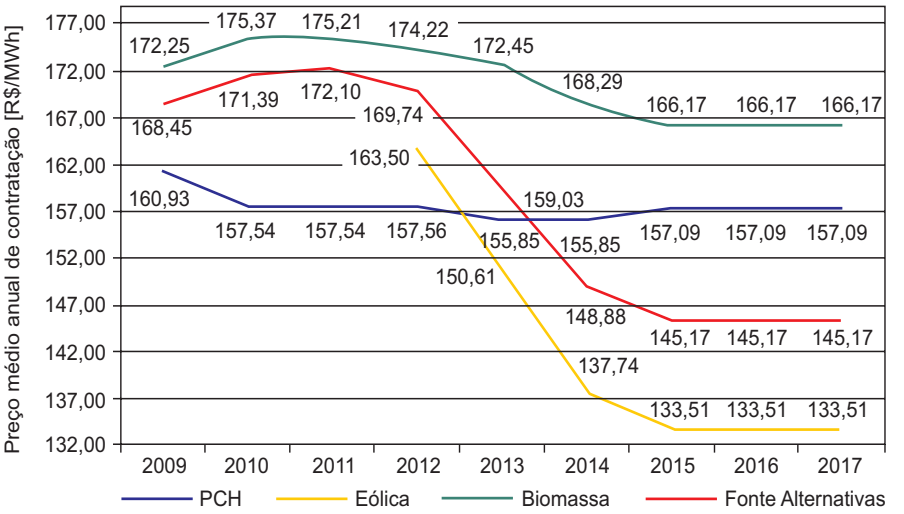


Figura 3.13
Preços médios de contratação em leilões de energia para fontes alternativas, Brasil, 2005-2017

Nota: valores de agosto de 2011.

Fonte: EPE (2010) apud Tomalquisim (2011).

No Capítulo 6, serão feitas considerações mais aprofundadas sobre as políticas de apoio ao desenvolvimento da bioeletricidade. Porém, é importante ressaltar que, mesmo com a perda relativa do dinamismo da demanda, a indústria brasileira tem, em grande medida, capacidade competitiva para ofertar a maior parte dos equipamentos para a produção de energia a partir da biomassa, com destaque para as plantas *turnkey* de cogeração de açúcar/álcool e a eletricidade com bagaço da cana-de-açúcar.

3.3.2. PCHs

3.3.2.1. Características e tendências

As pequenas centrais hidrelétricas são unidades de geração de energia hidráulica caracterizadas pelo pequeno porte dos equipamentos de

geração e por um sistema de captação que pressupõe uma baixa queda d'água e reservatórios de pequeno porte. No caso brasileiro, de acordo com a Resolução ANEEL nº 394/1998, uma PCH é definida pela potência (de 1 MW até 30 MW) e por reservatórios inferiores a 3 km^2, com as exceções previstas. Em geral, as usinas estão conectadas à rede, ainda que possam estar inteiramente associadas à autogeração por produtores independentes. Este é o caso, por exemplo, das grandes empresas eletrointensivas, como as do setor de cimento, metalurgia, siderurgia, entre outros. A construção da PCH, neste caso, seria um movimento de verticalização para a redução dos custos de produção.

Do ponto de vista do fornecimento de equipamentos para as PCHs – que é o objeto deste estudo – percebe-se a reprodução, em menor escala e complexidade, dos conjuntos de equipamentos necessários para a geração hidrelétrica de grande porte.

No caso do subsistema de captação da energia primária (queda ou vazão d'água), a comparação com as usinas hidrelétricas de maior porte é bastante evidente. Em ambos os casos, as obras civis constituem uma parte crucial dos custos do investimento. O sistema de captação conta, portanto, com menores custos de equipamentos, em geral, envolvidos nos dutos de aço (para a adução da água do reservatório até a casa de máquinas) ou em equipamentos de grande porte que servem a algum arranjo de barragens móveis. Neste último caso, os equipamentos podem ter alguma característica motriz que controle a vazão. Podem ser mecânicos, metalúrgicos ou de outros materiais, inclusive aparatos infláveis.

De qualquer forma, no caso da captação, são as empresas de engenharia de projeto e execução das obras que detêm a maior capacidade de comandar o subsistema. Projetos mais bem elaborados e menores prazos de execução das obras revelam uma maior vantagem competitiva.

Já no subsistema de geração, concentram-se os equipamentos de maior porte, tais como as turbinas hidráulicas e os hidrogeradores. As turbinas podem ser clássicas (Pelton, Francis e Kaplan, com muitas variantes)[21] ou de outros tipos (PIT, Michell-Banki). De acordo com o CERPCH, a escolha do tipo adequado dá-se em função das condições de vazão, queda líquida, altitude do local e conformação da rotação da turbina com a do gerador e altura de sucção, no caso das máquinas de reação.

21. Kaplan Bulbo, Kaplan Tubo, Kaplan S, por exemplo. Ver Nogueira e Tiago Filho (2007).

De qualquer forma, economicamente reside aqui a parcela mais significativa (e custosa) dos equipamentos para a PCH.

Dadas as economias de escala e escopo, produtoras de turbinas de grande porte, em geral, grandes empresas internacionalizadas (Votih Hidro, Alston, GE, Andritz, as quatro maiores do mundo), também atuam no segmento de PCHs, com grandes vantagens competitivas, asseguradas pelo domínio da tecnologia, desempenho superior, reputação das marcas e vantagens de custos associadas à maior escala da firma.

Há, entretanto, espaço para empresas menores e mais especializadas, sobretudo, nos geradores e nas turbinas para as usinas menores que 10 MW de potência instaladas e nas chamadas micro e miniusinas inferiores a 1 MW, localizadas quase sempre em unidades rurais. Por exemplo, segundo a European Small Hydropower Association (ESHA), existem pelo menos 60 empresas de pequeno porte que produzem equipamentos de geração para PCH, quase todas de base nacional.

Finalmente, no subsistema de controle e ligação, há a presença de centenas de fabricantes de equipamentos como reguladores de velocidade, painéis de medição e demais equipamentos de controle e ligação à rede, com características semelhantes a outras fontes de energia. Em geral, a concorrência neste segmento se dá via preços e a estrutura de oferta é composta por pequenas e médias empresas, além de empresas integradas e de grande porte de equipamentos elétricos.

Vale ressaltar, por fim, que cada vez mais empresas fabricantes de equipamentos, de todos os portes, têm adotado a prática de oferecer serviços *turnkey*, integrando todos os equipamentos à estrutura civil, incluindo todo o projeto. Atuam como empresas EPC, subcontratando os equipamentos que não produzem e comissionando-os diretamente na planta, tornando-se, ainda, responsáveis pela manutenção. Esse tipo de concorrência pela oferta de serviços e produtos diferenciados tem conduzido a um processo de concentração do mercado, com a dominância das empresas de maior porte (sobretudo para as usinas entre 10 MW e 30 MW).

A tabela a seguir procura sintetizar as características econômicas dos subsistemas industriais das PCHs.

Tabela 3.15 - Características econômicas de equipamentos para PCHs, por subsistema

Subsistema	Exemplos de equipamentos	Características
Captação	As obras civis são muito relevantes Há presença de equipamentos hidromecânicos (comportas, condutos forçados etc.)	O projeto e o prazo de execução das obras são as principais fontes de vantagem competitiva. Empresas de Engenharia (projeto e execução) comandam o segmento Empresas verticalizadas de soluções para PCH ofertam também equipamentos eletromecânicos
Geração	Turbinas Hidrogeradores Mancais	Concorrência por desempenho, preço, manutenção e reputação Presença de grandes empresas internacionalizadas (economias de escala e escopo com grandes equipamentos), mas também de empresas menores especializadas O controle da tecnologia é crucial Há soluções turnkey e EPC, com garantia de manutenção, o que pode ser uma grande vantagem competitiva
Controle e ligação	Reguladores de velocidade, Painéis de medição Demais equipamentos de controle e ligação	Segmentos heterogêneos: grandes, médias e pequenas empresas, com graus distintos de especialização A concorrência em preços é cada vez mais comum

Fonte: Elaboração própria.

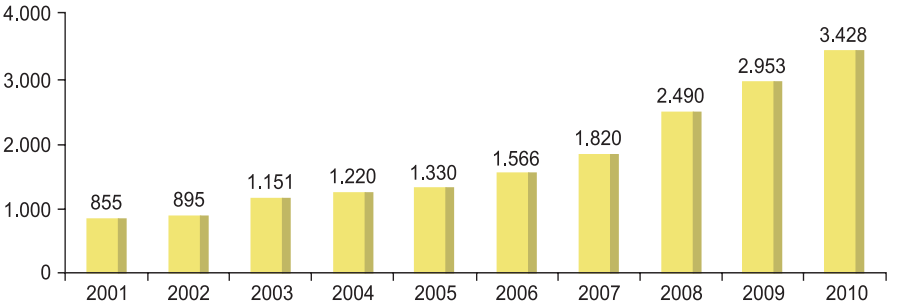
3.3.2.2. Estrutura da oferta no Brasil

Como já analisado, são consideradas PCH as instalações de 1 MW até 30 MW de potência instalada. A capacidade instalada deste conjunto de empreendimentos geradores de energia elétrica era, em 2011, de 3,7 GW, distribuídos em 412 usinas. Em 2001, eram apenas 855 MW instalados. Entre 2001 e 2011, a capacidade instalada cresceu 4,7%. A **Figura 3.14** mostra a evolução recente da estrutura de geração através da PCH.

De acordo com a ANEEL, estão em construção outras 51 PCHs, que acrescentarão quase 700 MW à capacidade instalada nacional. Além disto, já estão outorgadas 139 novas PCHs (+1900 MW) que, entretanto, não iniciaram suas obras.

Figura 3.14
Evolução da capacidade instalada em PCH, Brasil, 2001-2010 (em MW)

Fonte: BIG-ANEEL.



E esta evolução deve manter-se, ao menos, até o final da década. Segundo a EPE, até 2019 as PCHs cresceriam de 3,6% da capacidade geradora em 2010 para 4,2% em 2019. Ao fim do período, a potência instalada saltaria de cerca de 4 GW para 7 GW, indicando um crescimento de mais de 70% (ver **Tabela 3.16**). Tais informações, constantes do Plano Decenal de Expansão de Energia no Brasil, produzido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2010) e ligado ao MME, indicam que o potencial de mercado para a PCH é relativamente modesto, mas estaria longe de ser desprezível, sobretudo, porque poderia ocupar o restante do potencial hídrico do Sul e do Sudeste, praticamente esgotados para as maiores centrais hidrelétricas. Como se sabe, a proximidade dos mercados consumidores é um dos aspectos econômicos mais relevantes das PCHs, uma vez que a distribuição de energia poderia ser bem menos custosa.

Tabela 3.16 - Evolução prevista da capacidade instalada por fonte de geração, Brasil, 2010 e 2019

Tipo de empreendimento	2010	2019	2010-2019	
			em MW	em %
Hidráulicas	83.169	116.699	33.530	40,3
Gás natural	8.860	11.533	2.673	30,2
Óleo combustível	3.380	8.864	5.484	162,2
Biomassa	5.380	8.521	3.141	58,4
PCH	4.043	6.966	2.923	72,3
Eólica	1.436	6.041	4.605	320,7
Urânio	2.007	3.412	1.405	70,0
Carvão	1.765	3.205	1.440	81,6
Óleo diesel	1.728	1.149	-579	-33,5
Gás de processo	687	687	0	0,0
Total capacidade de geração	112.455	167.077	54.622	48,6

Fonte: EPE (2010).

Além disso, é importante ressaltar que a estrutura desta capacidade instalada é bastante fragmentada, tanto em número de usinas como em tamanho médio dos empreendimentos. Tal como no caso da biomassa, as fontes hidráulicas com PCH são bastante utilizadas por produtores independentes e autoprodutores. Incluem-se nestes casos as empresas eletrointensivas em busca de verticalização da produção e pequenas distribuidoras locais. Esse tipo de produtor de menor porte representa 87% da capacidade instalada das PCHs brasileiras. A **Tabela 3.17** descreve essas informações.

Tabela 3.17 - Estrutura da capacidade instalada da PCH, Brasil, 2011

Tipo de produtor	Potência fiscalizada		Nº de usinas	Tamanho médio
	MW	%		MW
Produtores independentes	3.002	79,4	224	13,4
Autogeração	291	7,7	81	3,6
Outros	489	12,9	107	4,6
Total PCH	3.782	100,0	412	9,2
% PCH no total UHE	4,8		228,9	
% PCH no total de geração no Brasil	3,3		16,4	

Fonte: BIG-ANEEL.

Este dinamismo estimulou a retomada da oferta de equipamentos no Brasil, inclusive com a maciça presença das quatro grandes empresas mundiais de hidrogeração (Alston, Voith Hydro, GE e Andritz).

Ainda que pese a impossibilidade de precisar informações quantitativas sobre a oferta de equipamentos, é possível afirmar que o país tem capacidade de ofertar competitivamente todos os equipamentos envolvidos em PCH. Esta vantagem foi estabelecida historicamente ao longo da expansão da energia hidrelétrica no Brasil, tanto de grande porte – o que torna o país um dos mais importantes centros produtores das quatro grandes – quanto em pequena escala. Neste caso, é marcante o número de empresas de capital nacional de grande (por exemplo, WEG) e pequeno portes (por exemplo, GR Máquinas do Mato Grosso do Sul), muitas delas detentoras de tecnologia de projeto e produto.

Há a sensação de ameaça por parte dos fornecedores asiáticos de equipamentos, mas, ao menos por enquanto, essa ameaça é bastante limitada. Por exemplo, entre 2000 e 2010, foram importados pouco mais de U$ 2 milhões em turbinas menores que 1 MW de potência, revelando um mercado marginal para as importações. Esta característica é corroborada pela estrutura de oferta em quase todos os países onde há uma capacidade instalada em energia hidrelétrica, em especial de pequeno porte. Nestes casos, a base nacional da produção é a característica comum, com as importações (sobretudo extrarregionais) sendo ainda muito modestas.

As empresas instaladas no Brasil gozam de outras vantagens competitivas, associadas ao domínio da tecnologia, à presença de empresas de projeto e construção dedicadas à PCH e à capacidade das empresas – mesmo as de menor porte – oferecerem soluções completas, integrando equipamentos, fabricando sob encomenda (equipamentos de captação, geração e ligação) e instalando todo o sistema através de projetos *turnkey*.

Outra vantagem competitiva importante é a proximidade do mercado consumidor. A capacidade de oferecer serviços rápidos e eficientes de assistência técnica e manutenção é uma vantagem crucial sobre os produtos importados.

As empresas brasileiras mais tradicionais – de diversos portes – produzem todos os equipamentos principais (turbinas, geradores e diversos equipamentos hidromecânicos), fazem projetos e oferecem soluções do tipo "chave na mão". Vale destacar que, tal como outras empresas do setor metal-mecânico tradicional, o segmento está concentrado no Sul e no Sudeste do país, com destaque para São Paulo e Santa Catarina. Em muitos casos, é possível afirmar existirem economias de aglomeração, em que a presença de muitas empresas metal-mecânicas, muitas voltadas para a produção de equipamentos para PCH, cria externalidades positivas que permitem ampliar a competitividade de modo generalizado, mesmo quando as firmas não têm grande porte.

Por fim, vale ressaltar que o problema da competitividade do setor produtor de equipamentos para a PCH no Brasil não é por parte da estrutura da oferta. O problema vem da elevada intermitência da demanda. Apesar do crescimento expressivo dos últimos anos, apesar da evolução futura aparentemente assegurada pelo planejamento

energético brasileiro, tem havido uma retração da participação da PCH nos leilões de energia realizados pela ANEEL.

A principal razão é falta de competitividade relativa dos empreendimentos de PCH *vis-à-vis* outros empreendimentos renováveis, tais como a eólica. Entre as principais razões, estão os possíveis obstáculos regulatórios, em especial na fase de projeto. Segundo a Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa (ABRAGEL), que congrega ¾ dos empreendimentos de PCH no Brasil, a ANEEL pode levar até quatro anos para aprovar os estudos de inventário – e o projeto básico. Este atraso, associado às maiores preocupações ambientais com os projetos de PCH, tem custos financeiros que, nos empreendimentos de longo prazo de maturação (no caso destas usinas, ao menos 12 anos de amortização do financiamento), podem torná-los proibitivos e pouco competitivos.

No caso do custo dos equipamentos, há outra dificuldade competitiva. Enquanto os equipamentos eólicos estão isentos de ICMS, os bens de capital para a PCH não contam com esse incentivo tributário. Somados ao custo do projeto (incluindo o custo de oportunidade no tempo) e ao custo das obras civis (50% do valor das PCHs), os empreendimentos em questão acabam sendo menos atraentes que os parques eólicos, por exemplo. Há riscos de que esta postergação estrutural da demanda possa minar, progressivamente, a capacidade de oferta, provocando uma retração num segmento da metal-mecânica que tem se mantido competitivo no Brasil por muitas décadas.

No Capítulo 6, serão tratadas as políticas que poderão reverter este quadro de imobilismo que impera sobre o setor de equipamentos para PCH.

3.4. Conclusões

Neste capítulo, foram apontadas as principais características econômicas e as tendências competitivas da indústria de BK de energia renovável nas quatro fontes de energia estudadas pela pesquisa. Também aqui se apresentou a estrutura presente da oferta destes equipamentos para energia renovável, tanto no Brasil como no mundo.

Também se procurou identificar a capacidade competitiva desses equipamentos no Brasil. De maneira geral, o país tem capacidade competitiva nos equipamentos para biomassa e PCHs. Tal competitividade deriva do

aprendizado acumulado por anos de liderança global na hidrogeração de grande porte – com reflexos positivos para os equipamentos para PCHs e demais equipamentos de controle e ligação – e na produção de açúcar e álcool, cujo resíduo (o bagaço da cana-de-açúcar) é o principal combustível da geração de bioeletricidade em plantas brasileiras de cogeração. Nos dois casos, as empresas de capital nacional, de diversos portes, têm capacidade competitiva, inclusive em projeto, fabricação e integração de equipamentos e instalação de usinas *turnkey*.

No entanto, as características da demanda – e do marco legal que a regula – e da oferta de outras fontes de energias renováveis em melhores condições competitivas (caso da eólica) ameaçam o ciclo de crescimento e consolidação do segmento produtor de equipamentos tanto para a biomassa quanto para as PCHs. A consequente intermitência da demanda pode reduzir o potencial competitivo que a estrutura de oferta detém no país.

Já no caso da energia solar fotovoltaica, pode-se afirmar que, no Brasil, a demanda e, mais ainda, a oferta de equipamentos voltados para a energia solar são ainda bastante incipientes. Há pesquisas em curso – em institutos de pesquisa e empresas privadas – para o desenvolvimento da produção nacional de silício em grau solar, *wafers* e células fotovoltaicas. Por ora, a baixa demanda é atendida por importações e pelo único produtor de módulos fotovoltaicos – montados com células importadas.

Por fim, no caso de equipamentos para energia eólica, observa-se um caso bem-sucedido de instalação, crescimento e consolidação competitiva de todo o segmento no Brasil. Tal evolução contou com um amplo apoio público, que desonerou a produção de equipamentos, garantiu a oferta de crédito em condições favoráveis e, graças ao um marco regulatório de sucesso, estimulou a atração de grandes empresas transnacionais que, por sua vez, têm promovido algum grau de nacionalização de partes e componentes.

A **Tabela 3.3** apresenta uma síntese deste esforço de análise de competitividade, identificando as fontes de energia e os subsistemas produtivos.

Tabela 3.18- Síntese da competitividade da indústria de bens de capital para energia renovável, por fontes e subsistemas, Brasil

	Solar	Eólica	PCHs	Biomassa
Equipamentos de captação	Baixa competitividade nacional. Produtor de módulos (com altíssimo conteúdo importado). O ainda baixo dinamismo da demanda e a falta de um marco regulatório ameaçam o desenvolvimento do segmento. Demanda atendida majoritariamente por importações. Ainda assim, há um esforço de pesquisa pela verticalização	Forte dinamismo da demanda e políticas de apoio (isenções tributárias, crédito BNDES e marco regulatório favorável) tornam o setor competitivo no Brasil. Segmento comandado por empresas transnacionais, que têm ampliado o investimento direto, buscando aproveitar as oportunidades. Há uma empresa nacional altamente competitiva no segmento de pás	Há competitividade no projeto de usinas de diversos portes (até 30 MW). Equipamentos de adução podem ser ofertados por empresas de diversos portes, sob encomenda	A extração e a movimentação de resíduos orgânicos têm competitividade
Equipamentos de geração	Idem. Equipamentos de captação e geração se confundem no conjunto módulo/células	Idem, com amplo domínio das empresas líderes mundiais. Maior conteúdo importado, mas com potencial de nacionalização	Segmento bastante competitivo. Empresas de diversos portes têm capacidade de oferecer soluções turnkey, inclusive projeto. Presença ativa das quatro maiores produtoras mundiais de hidrogeradores. A intermitência da demanda é um risco ao desenvolvimento do segmento	Segmento bastante competitivo. Empresas de capital nacional têm capacidade de oferecer soluções turnkey para plantas de cogeração, inclusive projeto e tecnologia. Boas perspectivas para a cogeração e a venda de excedente no mercado livre. Risco de encarecimento dos insumos orgânicos com as tecnologias de etanol de 2a geração (o foco da produção será o etanol combustível, não a eletricidade)
Equipamentos de ligação e controle	Inversores importados. Há espaço para a nacionalização	Há competitividade, mas empresas de diversos portes vêm enfrentando crescente concorrência em bases desiguais com os produtos asiáticos	Há competitividade, mas empresas de diversos portes vêm enfrentando crescente concorrência em bases desiguais com os produtos asiáticos	Há competitividade, mas empresas de diversos portes vêm enfrentando crescente concorrência em bases desiguais com os produtos asiáticos

4. Tecnologias emergentes e resultados da pesquisa de campo

Conforme destacado na parte introdutória deste relatório, os resultados apresentados neste capítulo seguem os procedimentos metodológicos referentes à pesquisa de campo.[22] Neste sentido e em relação aos resultados alcançados, cabe destacar num primeiro momento a amplitude da pesquisa de campo, em termos de respondentes, para posteriormente focar os resultados específicos obtidos com a aplicação dos questionários. Ressalta-se que os resultados apresentados neste capítulo[23] foram avaliados pelo comitê técnico, tendo a identificação das tecnologias relevantes sofrido pequena alterações, em função desta avaliação. Os resultados definitivos, em termos de interpretação da pesquisa de campo e da identificação das tecnologias emergentes, são o foco do próximo capítulo deste relatório.

22. O relatório da pesquisa de campo é apresentado na íntegra no Anexo II.

23. Seguindo a metodologia proposta no estudo.

4.1. Taxas de respostas

A composição do painel de respondentes do estudo é apresentada na **Figura 4.1**. Verifica-se que o painel é integrado por 388 especialistas, sendo que nas fontes de energia eólica e solar, há uma concentração maior de respondentes (47% e 30%, respectivamente). Com base nas respostas desse painel de especialistas, foram elaborados um banco de dados e as tabelas sínteses da pesquisa de campo apresentados no Anexo III.

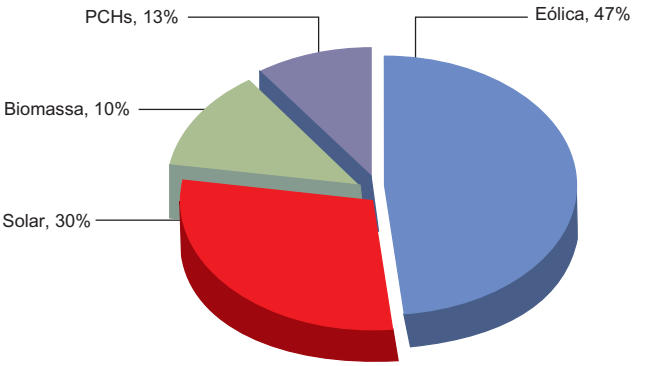


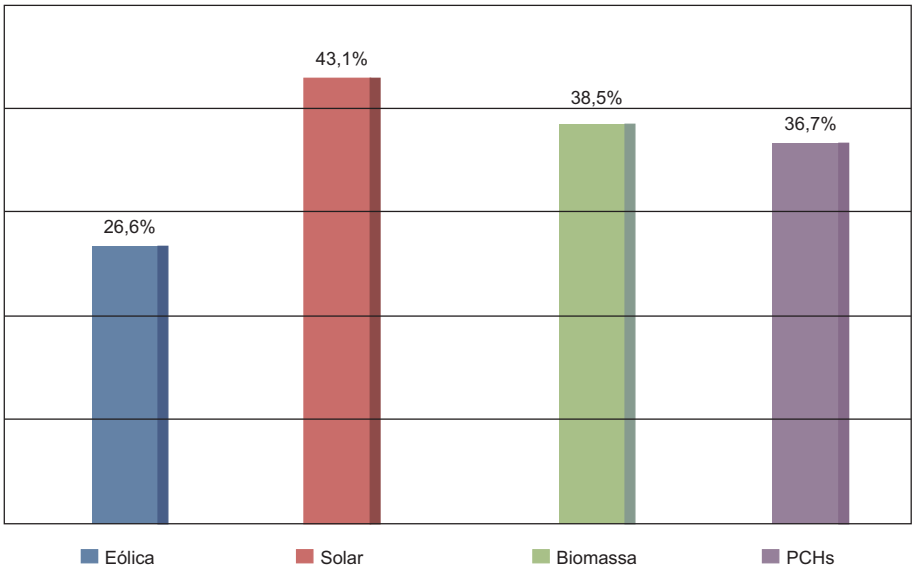
Figura 4.1
Composição e distribuição do painel de respondentes do estudo nas diversas fontes investigadas

Fonte: elaboração própria.

Fonte de energia	Eólica	Solar	Biomassa	PCH	Total
Nº de respondentes	184	116	39	49	388

Cabe destacar a taxa de participação do painel de respondentes na pesquisa de campo (**Figura 4.2**). Conforme os dados obtidos, ressalta-se que o estudo alcançou uma taxa de resposta de 34%, ou seja, um

total de 132 especialistas respondentes participou da pesquisa. De forma individual, nota-se que a energia solar alcançou o índice mais elevado de respostas (43%), seguido da biomassa (38%), PCH (36%) e eólica (26%).



Fonte de energia	Eólica	Solar	Biomassa	PCHs	Total
Nº de respostas obtidas na pesquisa de campo	49	50	15	18	132

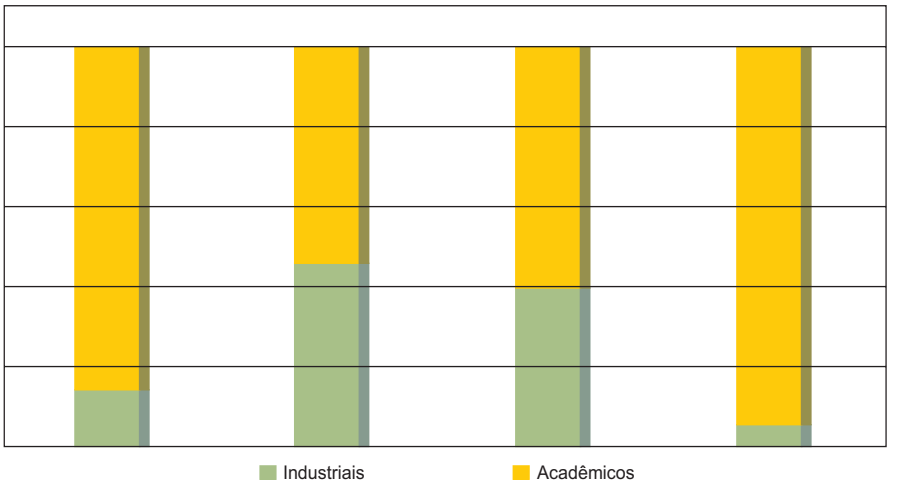
Figura 4.2
Índice de respostas obtidas (total de respondentes/ respostas)

Fonte: elaboração própria.

Em contrapartida, em termos absolutos, nas fontes de energia eólica e solar ocorreu uma maior participação (aproximadamente 50 respondentes em cada fonte), muito em função da própria composição do painel de respondentes, com um peso maior nessas duas fontes. Como destacado na metodologia da pesquisa de campo, a composição do painel de respondentes procurou ser homogênea, no sentido de contemplar especialistas ligados à academia e à indústria. Por outro lado, com base nas respostas obtidas, segundo a área de atuação dos especialistas respondentes, percebe-se uma forte participação da indústria *vis-à-vis* integrantes da academia. Nas fontes de energia eólica e PCH, a taxa de participação de acadêmicos nas respostas foi inferior a 20% (16% no caso da eólica e 6% em PCH). Em compensação, as respostas relacionadas à biomassa e à energia solar, a participação de especialistas do meio acadêmico foi mais significativa, em ambas, superior a 40%.

Figura 4.3
Composição dos respondentes no conjunto de respostas obtidas

Fonte: elaboração própria.

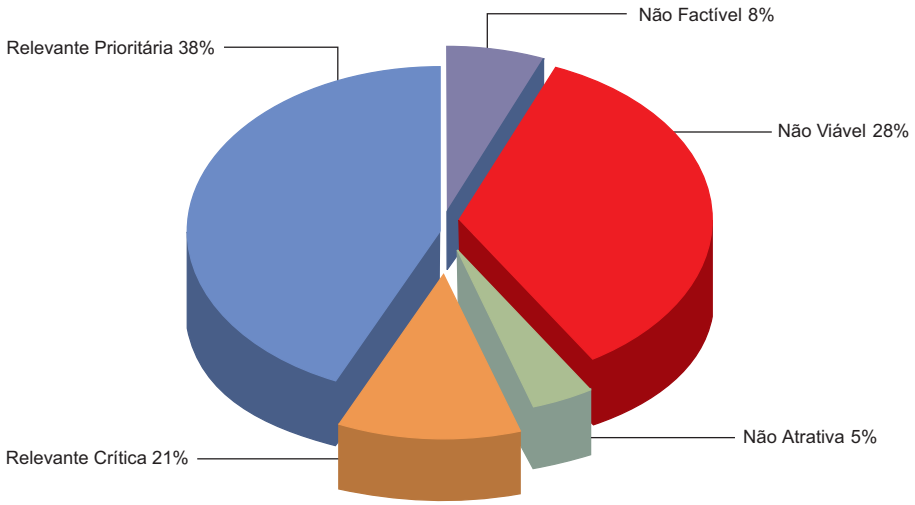


Portanto, podemos verificar que a pesquisa de campo alcançou uma taxa de respostas de aproximadamente 35%. As fontes de energia eólica e solar tiveram uma maior participação absoluta nas respostas. Em contrapartida, as fontes solar e biomassa alcançaram um maior percentual de resposta, em relação ao painel inicial. Por fim, cabe destacar que há uma maior concentração de respondentes da indústria, em detrimento da participação de acadêmicos. Apesar da composição inicial do painel de respondentes ser homogêneo entre acadêmicos e industriais, o índice de respostas foi significativamente mais elevado entre os representantes da indústria. Cabe agora analisar os resultados obtidos com a pesquisa de campo e o posterior processamento dos dados para cada fonte de energia.

4.2. Resultados em energia solar

Na pesquisa de campo relacionada à energia solar, foi obtido um total de 50 respostas na pesquisa. Com base nessas respostas (**Figura 4.4**), podemos identificar que, das 50 tecnologias analisadas, 18% foram consideradas não fatíveis, 38% não viáveis e 18% não atrativas. As tecnologias consideradas relevantes totalizam 26%, sendo que destas, 10 foram consideradas relevantes prioritárias e três relevantes críticas. Conforme a **Tabela 4.1** a seguir, as tecnologias relevantes para a fonte de energia solar estão concentradas em dois estágios distintos, quais sejam:

captação e ligação à rede. Portanto, como resultado da pesquisa de campo para a energia solar, nota-se que de um total de 50 tecnologias, 10 foram selecionadas como relevantes prioritárias e três como relevantes críticas, sendo que destas, há uma forte concentração de captação e ligação à rede.



Fonte de energia	Não factível	Não viável	Não atrativa	Relevante crítica	Relevante prioritária	Total de tecnologias investigadas
Nº de tecnologias	9	19	9	3	10	50

Figura 4.4
Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia solar

Fonte: elaboração própria.

Mais especificamente, podemos verificar quais tecnologias foram consideradas não relevantes e abandonadas da análise (**Tabela 4.1**). Em relação às tecnologias "não factíveis", a grande maioria está relacionada aos sistemas auxiliares e de controle, relacionados à ligação com a rede. As tecnologias "não viáveis" são novamente as mais heterogêneas, perpassando os diversos sistemas analisados e as diferentes etapas. Por fim, as tecnologias consideradas "não atrativas" estão distribuídas nos sistemas de materiais (principalmente as voltadas à captação) e nos sistemas eletromecânicos.

Tabela 4.1 - Tecnologias consideradas não relevantes na fonte de energia solar

Classificação das tecnologias	Tecnologia
Não factível	Uso do arsenieto de gálio para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso de inversores autocomutados e chaveados por tiristores GTO para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores autocomutados e chaveados por transistores bipolares BT para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica e chaveados por tiristores para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica e chaveados por transistores IGBT para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores autocomutados com transformador de alta frequência para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica com transformador de baixa frequência para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de controladores de carga do tipo contínuo (liga-desliga) para baterias.
	Uso de controladores de carga com compensação de temperatura para baterias.
Não viável	Uso de plasma térmico para a redução do quartzo de alta pureza para a produção de lâminas de silício para a produção de células solares
	Uso de solidificação direcional com lingotamento contínuo a para obtenção de bloco multicristalino para a produção de lingotes de silício
	Uso do método de fusão zonal flutuante para a obtenção de bloco multicristalino para a produção de lingotes de silício
	Uso de compostos dos grupos I-III-VI (disselenato de cobre índio (CIS – CuInSe2), disselenato de cobre gálio índio [CIGS – Cu(InGa)Se2] e outros) para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso de módulos fotovoltaicos com espelhos com concentração
	Uso de módulos fotovoltaicos com lentes com concentração
	Uso de eixo polar com orientação norte-sul inclinado em sistemas de seguimento com rotação
	Uso de eixo vertical com orientação azimutal em sistemas de seguimento com rotação
	Uso de inversores autocomutados com saída em média tensão (1 kVCA a 35 kVCA) para a ligação com a rede elétrica (CR).
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica com saída em baixa tensão (100 VCA a 400 VCA) para a ligação com a rede elétrica (CR).
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica com saída em média tensão (1 kVCA a 35 kVCA) para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de baterias chumbo-ácido AGM (absorbed glass mat)
	Uso de baterias níquel-cádmio
	Uso de baterias níquel-zinco
	Uso de concentradores cilindro-parabólicos (trough) em sistema heliotérmico
	Uso de concentradores com refletores lineares fresnel em sistema heliotérmico
	Uso de concentrador com receptor central (torre) em sistema heliotérmico
	Uso de concentrador com discos parabólicos (dish) em sistema heliotérmico
	Uso de tecnologias de sais fundentes para o armazenamento de energia térmica com calor latente em sistema heliotérmico

Não atrativa	Uso de rota química para a purificação do silício para a produção de células solares
	Uso de solidificação direcional HEM (Heat Exchange Method) para a obtenção de bloco multicristalino para a produção de lingotes de silício
	Uso do silício amorfo e microcristalino para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso do telureto de cádmio para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso de materiais orgânicos para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso de módulos fotovoltaicos estáticos com concentração
	Uso de eixo horizontal com orientação leste-oeste em sistemas de seguimento com rotação
	Uso de dois eixos controlados independentemente (vertical e horizontal) com orientação normal à radiação solar em sistemas de seguimento com rotação
	Uso de controladores de carga do tipo pulsado (PWM) para baterias

Fonte: elaboração própria.

Como destacado, as **Tabelas 4.2** e **4.3** apresentam as tecnologias consideradas relevantes, prioritárias e críticas para a IBKER referentes à energia solar.

As tecnologias relevantes prioritárias estão distribuídas, principalmente, entre os sistemas de materiais, no que diz respeito à captação, e os sistemas eletroeletrônicos relacionados à ligação à rede. Em contrapartida, as tecnologias relevantes e críticas referem-se exclusivamente aos sistemas eletroeletrônicos de ligação com a rede.

Tabela 4.2 - Classificação das tecnologias relevantes prioritárias para a fonte de energia solar, segundo subsistema

Segmentos tecnológicos	Materiais e insumos	Sistemas eletromecânicos	Sistemas eletrônicos	Sistemas auxiliares e de controle
Captação				
Uso de rota metalúrgica para a purificação do silício para a produção de células solares	X			
Uso do método Czochralski para a produção de lingotes de silício	X			
Uso de silício cristalino (monocristalino e multicristalino) para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos	X			
Uso de eixo horizontal com orientação norte-sul em sistemas de seguimento com rotação		X		
Transformação				
–	–	–	–	–
Ligação à rede				
Uso de inversores autocomutados e chaveados por transistores IGBT para a ligação à rede elétrica (CR)				X
Uso de inversores autocomutados sem transformador para ligação à rede elétrica (CR)				X
Uso de inversores autocomutados com saída em baixa tensão (100 V_{CA} a 400 V_{CA}) para ligação à rede elétrica (CR)				X
Uso de inversores baseados em modulação senoidal por largura de pulso (PWM) para sistemas isolados				X
Uso de baterias chumbo-ácido com gel				X
Uso de baterias chumbo-ácido com eletrólito líquido				X

Fonte: elaboração própria.

Tabela 4.3 - Classificação das tecnologias relevantes críticas para a fonte de energia solar, segundo subsistema

Segmentos tecnológicos	Materiais e insumos	Sistemas eletromecânicos	Sistemas eletrônicos	Sistemas auxiliares e de controle
Captação				
–	–	–	–	–
Transformação				
–	–	–	–	–
Ligação com a rede				
Uso de inversores autocomutados e chaveados por MOSFET para a ligação com a rede elétrica (CR)				X
Uso de inversores autocomutados com transformador de baixa frequência para a ligação com a rede elétrica (CR)				X
Uso de controladores de carga com seguidor do ponto de máxima potência (MPPT) para baterias				X

Fonte: elaboração própria.

4.3. Resultados para energia eólica

Na pesquisa de campo relacionada à fonte de energia eólica, foi obtido um total de 49 respostas. Dum total de 39 tecnologias emergentes investigadas (ver **Figura 4.5**), 7,7% foram consideradas não factíveis, 28% não viáveis e 5,1% não atrativas. Em contrapartida, 59% das tecnologias investigadas foram consideradas relevantes, sendo que oito dessas tecnologias foram classificadas como relevantes críticas e 15 como relevantes prioritárias.

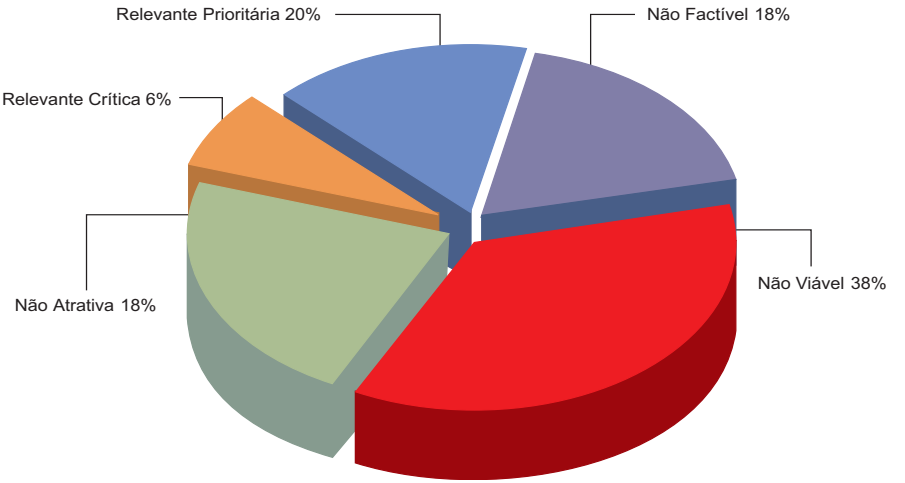


Figura 4.5
Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia eólica

Fonte: elaboração própria.

Fonte de energia	Não factível	Não viável	Não atrativa	Relevante crítica	Relevante prioritária	Total de tecnologias investigadas
Nº de tecnologias	3	11	2	7	15	39

A **Tabela 4.4** identifica as tecnologias que foram "descartadas" na análise, por não terem sido consideradas relevantes. Em relação às tecnologias consideradas "não factíveis", verifica-se que as mesmas estão vinculadas a materiais e sistemas auxiliares. Já as tecnologias consideradas "não viáveis", concentram a maioria das tecnologias "descartadas" e estão vinculadas aos diversos sistemas analisados (materiais, sistemas eletromecânicos, sistemas eletrônicos, sistemas auxiliares e de controle). Por fim, as tecnologias "não atrativas" referem-se aos sistemas auxiliares e de controle, e há um aerogerador específico.

Tabela 4.4 - Tecnologias consideradas não relevantes na fonte de energia eólica

Classificação das tecnologias	Tecnologia
Não factível	Uso de fios de supercondutividade em geradores elétricos para a redução das perdas elétricas durante a geração
	Uso de baterias níquel-cádmio
	Uso da tecnologia LIDAR (Light Detection and Ranging) em aparelhos e equipamentos para a medição do vento para proporcionar maior acurácia na medição de ventos em diversas alturas
Não viável	Uso de ligas especiais em parafusos de fixação de torres, naceles e pás
	Uso de controle ativo de potência tipo *pith* para aerogeradores de pequeno porte
	Uso de baterias chumbo-ácido com gel
	Uso de baterias chumbo-ácido AGM (absorbed glass mat)
	Uso de aerogeradores de 100 kW
	Uso de *tripodstructure* em projetos de fundação de parques eólicos offshore para profundidades rasas e intermediárias (0 – 60 m)
	Uso de "plataformas flutuantes" em projetos de fundações de parques eólicos *offshore* para profundidades altas (60 – 900 m)
	Uso de *monopile* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 – 60 m)
	Uso de *jacket structure* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 – 60 m)
	Uso de *gravity* base *structure* em projetos de fundação de parques eólicos offshore para profundidades rasas e intermediárias (0 – 60 m)
	Uso de dispositivos Scanter para a correção dos efeitos do vento sobre os radares de controle aéreo e meteorológicos
Não atrativa	Uso de controle ativo de freios em pás de aerogeradores de pequeno porte
	Uso de aerogeradores de pequeno porte (até 5 kW) do tipo *savonius* para a geração de energia elétrica em edifícios e casas

Fonte: elaboração própria

As **Tabelas 4.5** e **4.6** destacam as tecnologias relevantes identificadas na pesquisa de campo, levando em consideração o caráter crítico e prioritário da mesma, respectivamente.

Em relação a esta fonte de energia, nota-se que a maioria das tecnologias relevantes está concentrada no estágio de captação da fonte (o vento). Ainda em relação às tecnologias relevantes para a energia solar, constata-se a relevância das tecnologias relacionadas à ligação com a rede. Portanto, como resultado da pesquisa de campo para a energia eólica, verifica-se que foram identificadas 15 tecnologias relevantes e prioritárias, e sete tecnologias relevantes e críticas. Essas tecnologias estão relacionadas às etapas de captação, ligação com a rede e principalmente, transformação.

Tabela 4.5 - Classificação das tecnologias relevantes prioritárias para a fonte de energia eólica, segundo subsistema

Segmentos tecnológicos	Materiais e insumos	Sistemas eletro-mecânicos	Sistemas eletrônicos	Sistemas auxiliares e de controle
Captação				
Uso de torre autoportante para aerogeradores acima de 10 kW visando minimizar custos	X			
Uso de tintas especiais em equipamentos elétricos e mecânicos offshore (partes acima do nível da água e partes submersas) para a proteção atmosférica	X			
Uso de navios especiais para o transporte e a instalação de aerogeradores previamente montados e comissionados	X			
Uso de modelos de pá mais adequado ao perfil do vento brasileiro visando um melhor aproveitamento de velocidades mais baixas	X			
Uso de controle ativo do posicionamento em aerogeradores de pequeno porte aumentando a eficiência na captação do vento (aerogeradores sem rabeta/leme)		X		
Transformação				

Tabela 4.5 (continuação)				
Uso de ímã permanente em neodímio para máquinas elétricas de alto desempenho	X			
Uso de aerogeradores de 10 kW em sistemas isolados		X		
Ligação com a rede				
Uso de sistemas de controle inteligentes em grandes parques eólicos para a conexão com a rede elétrica				X
Uso de inversores inteligentes em sistemas híbridos solar-eólico-diesel para um gerenciamento mais inteligente das fontes de geração e controle de demanda			X	
Uso de conversores de potência para a compensação de reativos em grandes parques eólicos			X	
Uso de conversores de potência na conexão com a rede para a redução de perdas e o fornecimento de energia em alta qualidade			X	
Uso de analisadores de qualidade de energia integrados aos medidores de energia para melhor monitoramento da geração e de seu desempenho na rede			X	
Uso de baterias níquel	X			
Uso de baterias chumbo	X			

Fonte: elaboração própria.

Tabela 4.6 - Classificação das tecnologias relevantes críticas para a fonte de tecnologia eólica, segundo subsistema

Segmentos tecnológicos	Materiais e insumos	Sistemas eletromecânicos	Sistemas eletrônicos	Sistemas auxiliares e de controle
Captação				
Uso de fibra de carbono visando a confecção de pás mais leves e resistentes	X			
Uso de tintas especiais em equipamentos elétricos e mecânicos offshore (partes acima do nível da água e partes submersas) para a proteção atmosférica	X			
Transformação				
Uso de materiais de alto desempenho para as caixas de redução		X		
Uso de materiais de alto desempenho em sistemas de freio de emergência		X		
Uso de lubrificantes especiais para as caixas de redução	X			
Uso de aerogeradores de 50 kW		X		
Ligação com a rede				
Uso de controladores de carga inteligentes no controle de carga e descarga das baterias para uma maior eficiência e redução de perdas		X		

Fonte: elaboração própria.

4.4. Resultados em energia de biomassa

No caso da fonte de energia ligada à biomassa, obteve-se um total de 15 respostas aos questionários. Verifica-se, com base nas respostas (**Figura 4.6**), que do total de 31 tecnologias analisadas, 9,7% foram consideradas não factíveis, 58% não viáveis e 9% não atrativas. Aproximadamente 30% das tecnologias foram consideradas relevantes, sendo que destas, seis foram classificadas como relevantes prioritárias e apenas uma como relevante crítica. Em relação às tecnologias entendidas como relevantes (**Tabela 4.7**), nota-se que todas estão relacionadas ao estágio de transformação da fonte de energia em energia propriamente dita.

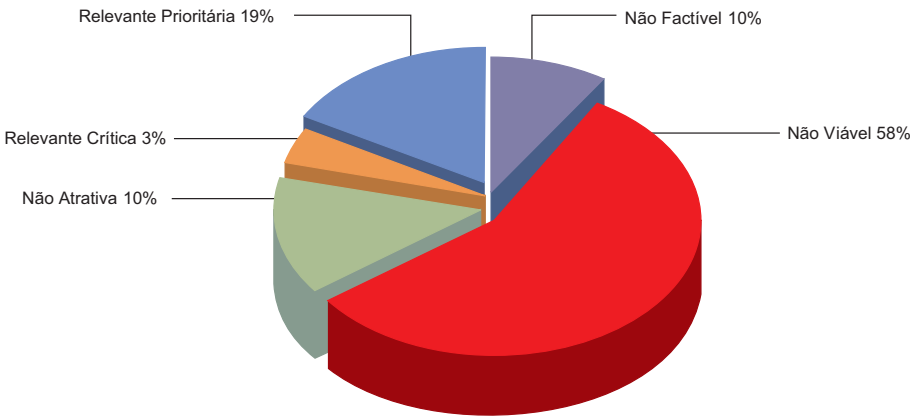


Figura 4.6
Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia de biomassa

Fonte: elaboração própria.

Fonte de energia	Não factível	Não viável	Não atrativa	Relevante crítica	Relevante prioritária	Total de tecnologias investigadas
Nº de tecnologias	3	18	3	1	6	31

Com base na lista de tecnologias consideradas não relevantes (**Tabela 4.7**), podemos verificar que as tecnologias "não factíveis" estão concentradas no sistema eletromecânico relacionado à etapa de transformação. As tecnologias consideradas "não viáveis" são as mais heterogêneas, estando distribuídas pelos diversos sistemas analisados e diferentes etapas. Já as tecnologias "não atrativas", relacionam-se ao sistema eletromecânico e à etapa de geração. Já as **Tabelas 4.8** e **4.9** a seguir apresentam as tecnologias relevantes prioritárias e críticas para biomassa.

Tabela 4.7 - Tecnologias consideradas não relevantes na fonte de energia de biomassa

Classificação das tecnologias	Tecnologia
Não factível	Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da hidrólise ácida da biomassa
	Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da conversão de gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
	Uso em célula a combustível de etanol direto de bioetanol obtido a partir da conversão de gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
Não viável	Uso em célula a combustível de etanol direto de bioetanol obtido a partir da hidrólise ácida da biomassa
	Uso em motor de combustão interna de biodiesel obtido a partir da conversão de gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
	Uso em motor de combustão interna de biodiesel obtido a partir da pirólise da biomassa
	Uso em motor de combustão interna de diesel obtido a partir do gás de síntese
	Uso em motor de combustão interna de gasolina obtida a partir do gás de síntese
	Uso em uma célula a combustível de óxido sólido de biogás obtido a partir da digestão anaeróbica da biomassa
	Uso em um sistema "reformador – célula a combustível de membrana polimérica", de biogás obtido por meio da digestão anaeróbica da biomassa
	Uso em uma turbina a gás do gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa
	Uso em um sistema "purificador – célula a combustível de membrana polimérica", de gás de síntese obtido por meio de gaseificação de biomassa
	Uso em um sistema "purificador – reformador – célula a combustível de Óxido Sólido", de gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa
	Uso em uma "célula combustível – membrana polimérica", de hidrogênio obtido através da conversão de gás de síntese proveniente da gaseificação d biomassa

	Uso em uma “célula combustível – óxido sólido”, de hidrogênio obtido através da conversão de gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
	Uso em uma “célula a combustível de metanol direto”, de metanol obtido através da conversão de gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
	Uso em um ciclo stirling de calor obtido por meio da combustão da biomassa
	Uso em turbinas de queima externa (EFGT) de calor obtido por meio da combustão da biomassa
	Uso em motor a vapor (de pistão) do vapor obtido por meio da combustão da biomassa
	Uso em motor a vapor (de rosca) do vapor obtido por meio da combustão da biomassa
	Uso em microturbina a vapor do vapor obtido por meio da combustão da biomassa
Não atrativa	Uso em Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) do vapor obtido por meio da combustão da biomassa e do gás natural
	Uso em Ciclo Rankine do vapor obtido por meio da cocombustão da biomassa e do carvão
	Uso em Ciclos a Vapor Rankine do vapor obtido por meio da cocombustão da biomassa e do gás natural

Fonte: elaboração própria.

Tabela 4.8 - Classificação das tecnologias relevantes prioritárias para a fonte de energia biomassa, segundo subsistema

Segmentos tecnológicos	Materiais e insumos	Sistemas eletromecânicos	Sistemas eletrônicos	Sistemas auxiliares e de controle
Captação				
Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da hidrólise enzimática da biomassa		X		
Uso em célula a combustível de etanol direto do bioetanol obtido a partir da hidrólise enzimática da biomassa		X		
Uso em motor de combustão interna do bioetanol obtido a partir da fermentação/destilação da cana-de-açúcar		X		
Uso em motor de combustão interna do biodiesel obtido a partir da transesterificação de óleos vegetais		X		
Uso em um sistema "purificador – motor de combustão interna" do gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa		X		
Transformação				
–	–	–	–	–
Ligação à rede				
–	–	–	–	–

Fonte: elaboração própria.

As tecnologias relevantes e prioritárias referem-se à etapa de transformação e aos sistemas eletromecânicos, mais especificamente aos diferentes tipos de motores e células combustíveis. Já a única tecnologia considerada relevante e crítica também se refere à etapa de transformação e ao sistema eletromecânico.

Tabela 4.9 - Classificação das tecnologias relevantes e críticas para a fonte de energia biomassa, segundo subsistema

Segmentos tecnológicos	Materiais e insumos	Sistemas eletromecânicos	Sistemas eletrônicos	Sistemas auxiliares e de controle
Captação				
–	–	–	–	–
Transformação				
Uso em motor de combustão interna de biogás obtido a partir da digestão anaeróbica da biomassa		X		
Ligação com a rede				
–	–	–	–	–

Fonte: elaboração própria.

4.5. Resultados em energia PCH

Em relação às PCHs, das 59 tecnologias analisadas, com base num total de 18 respostas aos questionários, percebe-se que 15% das tecnologias foram consideradas não factíveis, 47% não viáveis e 5% não atrativas. Em contrapartida, 31% das tecnologias analisadas foram consideradas relevantes, sendo que destas, 18 foram classificadas como relevantes prioritárias e uma como relevante crítica (**Figura 4.7**). As tecnologias relevantes em PCH estão concentradas na etapa de ligação à rede e principalmente de transformação da fonte em questão em energia.

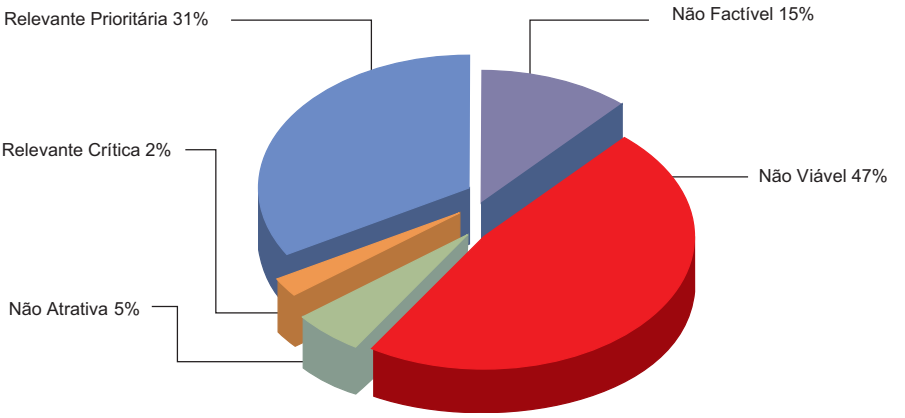


Figura 4.7
Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia PCH

Fonte: elaboração própria.

Fonte de energia	Não factível	Não viável	Não atrativa	Relevante crítica	Relevante prioritária	Total de tecnologias investigadas
Nº de tecnologias	9	28	3	1	18	59

Em relação às tecnologias "descartadas", podemos verificar, conforme a **Tabela 4.10**, que as consideradas "não factíveis" referem-se principalmente à etapa de geração, mais especificamente a um amplo conjunto de turbinas. Já as não viáveis referem-se, novamente, às diversas etapas e aos diferentes sistemas investigados. As tecnologias "não atrativas", de forma similar às "não viáveis", relacionam-se à etapa de transformação e ao sistema eletromecânico.

Em contrapartida, as tecnologias consideradas relevantes prioritárias e críticas (**Tabelas 4.11** e **4.12**, respectivamente) estão distribuídas em diferentes etapas (captação, transformação e ligação com a rede), demonstrando que as possibilidades de avanços tecnológicos nesta fonte de energia (apesar da mesma poder ser considerada tradicional) são amplas e realizáveis pela IBKER nacional. Já a tecnologia identificada como relevante e crítica está vinculada à etapa de captação.

Tabela 4.10 - Tecnologias consideradas não relevantes na fonte de energia PCH

Classificação das tecnologias	Tecnologia
Não factível	Uso de turbinas Kaplan do tipo "S" com gerador externo vertical
	Uso de turbinas Kaplan do tipo tubular com gerador externo vertical
	Uso de conjunto hidrogerador do tipo "straflo" (fluxo direto) com rotor do gerador solidário ao da turbina
	Uso de turbina não convencional de fluxo cruzado ou Michell-Banki
	Uso de turbina não convencional de bomba funcionando como turbina
	Uso de turbina não convencional Turgo
	Uso de sistema mecânico (óleo hidráulico) com regulador de velocidade
	Uso de sistema analógico com regulador de velocidade
	Uso de isolamento a seco com transformadores
Não viável	Uso de turbina Francis para centrais de baixas rotações específicas (Francis lenta)
	Uso de turbina Francis para centrais de altas rotações específicas (Francis dupla)
	Uso de turbina Axial (pás fixas) de altas rotações específicas (5 a 6 pás)
	Uso de turbina Axial (pás fixas) de muito altas rotações específicas (4 pás)
	Uso de turbina Axial (pás fixas) de altíssimas rotações específicas (3 pás)
	Uso de turbina axial do tipo Kaplan (pás móveis) de altas rotações específicas (5 a 6 pás) com pás do rotor fixas e pás do distribuidor móveis
	Uso de turbinas Kaplan do tipo tubular com gerador externo a montante
	Uso de turbinas Kaplan do tipo tubular com gerador externo a jusante
	Uso de turbinas bulbo com gerador externo
	Uso de turbinas bulbo com gerador interno do tipo PIT (poço)
	Uso de turbina não convencional Francis do tipo turbilhão
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor axial
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor axial e tubo de sucção
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor Darrieus
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor helicoidal ou Gorlov
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor do tipo parafuso de Arquimedes
	Uso de gerador convencional de rotação constante síncrono, inferior a 1 MW, de eixo vertical com rotações inferiores a 600 rpm
	Uso de gerador convencional de rotação constante assíncrono
	Uso de gerador convencional de rotação constante síncrono, de ímã permanente
	Uso de gerador não convencional de rotação variável
	Uso de excitatriz estática
	Uso de operação assistida no sistema de supervisão da central
	Uso de chaveamento manual
	Uso de colunas oscilantes na geração de energia de ondas do mar
	Uso de flutuadores em geração de energia de ondas do mar
	Uso de geradores de energia cinética em geração de energia de ondas do mar
	Uso de geradores de energia potencial em geração de energia de ondas do mar
Não atrativa	Uso de turbinas hidráulicas do tipo Pelton para centrais de baixas rotações específicas (altas quedas e pequenas vazões) com 1 e 2 jatos
	Uso de turbinas hidráulicas do tipo Pelton para centrais de médias rotações específicas (altas quedas e médias vazões) com 3, 4 ou 6 jatos
	Uso de turbina axial do tipo Kaplan (pás móveis) de altas rotações específicas (5 a 6 pás) com pás do rotor móveis e pás do distribuidor móveis

Fonte: elaboração própria.

Tabela 4.11 - Classificação das tecnologias relevantes prioritárias para PCH, segundo subsistema

Segmentos tecnológicos	Materiais e insumos	Sistemas eletromecânicos	Sistemas e letrônicos	Sistemas auxiliares e de controle
Captação				
Uso de turbina Francis para centrais de médias rotações específicas (Francis normal)		X		
Uso de turbina Francis para centrais de altas rotações específicas (Francis rápida)		X		
Uso de turbina axial do tipo Kaplan (pás móveis) de altas rotações específicas (5 a 6 pás) com pás do rotor móveis e pás do distribuidor fixas		X		
Uso de turbinas Kaplan do tipo "S" com gerador externo a montante		X		
Uso de turbinas Kaplan do tipo "S" com gerador externo a jusante		X		
Uso de turbina com caixa espiral de aço		X		
Uso de excitatriz rotativa		X		
Transformação				
Uso de gerador convencional de rotação constante síncrono, com rotações superiores a 600 rpm		X		
Uso de gerador convencional de rotação constante do tipo hidrogerador (gerador síncrono, com baixas rotações)		X		
Uso de sistema digital com regulador de velocidade			X	
Uso de sistema digital integrado (velocidade e de tensão) com regulador de velocidade			X	
Uso de regulador de tensão		X		
Ligação à rede				
Uso de operação desassistida no sistema de supervisão da central				X
Uso de operação desassistida remota no sistema de supervisão da central				X
Uso de tecnologia CLP no sistema de supervisão da central		X		
Uso de tecnologia totalmente digital no sistema de supervisão da central			X	

Fonte: elaboração própria.

Tabela 4.12 - Classificação das tecnologias relevantes críticas para PCH, segundo subsistema

Segmentos tecnológicos	Materiais e insumos	Sistemas eletromecânicos	Sistemas eletrônicos	Sistemas auxiliares e de controle
Captação				
Uso de turbina com caixa espiral de concreto		X		
Transformação				
–	–	–	–	–
Ligação à rede				
–	–	–	–	–

Fonte: elaboração própria.

5. Energia renovável e os impactos sobre a IBKER no Brasil

Introdução

O objetivo deste capítulo é analisar os possíveis impactos na indústria de bens de capital no Brasil à luz dos resultados da pesquisa de campo descrita no Capítulo 4. A tentativa de estimar os impactos da adoção, consolidação e expansão de cada uma das fontes de energia renováveis descritas neste estudo encontra uma dificuldade inerente a qualquer exercício deste tipo. É preciso determinar qual será, justamente, a extensão do uso de cada uma das fontes renováveis no futuro próximo. Mesmo aceitando que tais fontes ocuparão, na matriz energética brasileira, um espaço complementar e limitado, ainda que crescente, é preciso reconhecer que qualquer exercício de análise do impacto da prospectiva tecnológica na indústria de bens de capital brasileira depende de uma avaliação do tamanho do mercado demandante de cada equipamento.

O tamanho dessa demanda potencial é, por sua vez, determinado pelo marco regulatório, por políticas de incentivo e proteção, pelo volume e condições de financiamento, e por outros elementos econômicos cuja estimação é bastante complexa (tal como, a evolução dos preços do petróleo e sua influência inversamente proporcional sobre, por exemplo, os preços das células fotovoltaicas).

Por esta razão, a capacidade de consolidação ou expansão de uma determinada fonte de energia determinará o tamanho da demanda por equipamentos. Tal demanda pode ir de marginal a muito ampla. Pode ser atendida por grandes empresas atuantes no Brasil ou por importações. Pode atrair grandes fabricantes multinacionais para operarem nacionalmente ou pode consolidar a participação de pequenos produtores locais. As possibilidades da demanda futura são, portanto, muito amplas e incertas para que a tarefa de estimar se as tecnologias críticas e estratégicas destacadas na pesquisa de campo serão ou não incorporadas pela indústria de bens de capital no Brasil.

Para mitigar a complexidade da tarefa de estimativa de um futuro incerto em termos econômicos e institucionais, o presente estudo adotou uma metodologia simplificada, mas que pode ser facilmente readaptada conforme evoluam no tempo as variáveis em questão.

Em primeiro lugar, para cada uma das quatro fontes aqui aprofundadas, foram definidos três *modelos de negócio* ou formas de expansão

do uso das fontes no Brasil. Cada um desses modelos implicará em impactos diferentes sobre a indústria de bens de capital que ofertará equipamentos para a solução da geração energética adotada. *Grosso modo*, a diferença está no tamanho do mercado potencial (para os equipamentos) explicitado em cada um dos modelos de negócios.

Vale ressaltar que tais modelos não são mutuamente excludentes, isto é, podem ocorrer simultaneamente. Mesmo assim, o exercício que se segue procurou hierarquizar as possibilidades de desenvolvimento de cada um desses modelos de negócio no Brasil, a partir do atual estágio das políticas de regulação e incentivo, além do estado da estrutura atual e esperada da oferta de cada um destes arranjos de geração de energia.

Os modelos de negócios adotados são:

- **Sistemas ligados à rede.** Neste caso, encontram-se os parques geradores de porte elevado,[24] construídos e operados para a alimentação exclusiva do sistema energético nacional. Em geral, tais arranjos são operados pelas grandes companhias concessionárias, estatais e privadas, de geração e/ou distribuição de energia. Podem ter ou não a participação acionária de grandes fornecedores de equipamentos[25] e, em geral, são concedidas através de leilões de energia nova comandados pela ANEEL. Obviamente, tais arranjos geram a maior demanda individual por equipamentos, graças à elevada escala dos sistemas.
- **Sistemas residenciais e/ou isolados.** Aqui, foram alocados os arranjos de porte atomizado, em que os equipamentos geram energia para o consumo limitado a residências (ligadas ou não à rede) ou a pequenos grupos de residências, neste caso, localizadas em comunidades isoladas, não ligadas ao sistema nacional de distribuição de energia. No caso dos sistemas isolados, o arranjo pode envolver grupos geradores de uma única fonte ou sistemas de múltiplas fontes complementares (combustível fóssil, fotovoltaica e eólica). Além disto, tais sistemas isolados contam, muitas vezes, com algum aparato de armazenagem de energia como superação da intermitência da geração renovável. Já no caso das residências urbanas, o modelo de negócio pode contemplar equipamentos desconectados da rede (e, portanto, também com algum tipo de aparato de armazenagem) ou sistemas ligados a uma rede inteligente, que permite o uso de tarifas *feed in.*[26] De qualquer modo, em ambos os casos, a demanda

24. Resguardadas as devidas proporções sobre porte. Enquanto o porte médio das hidrelétricas brasileiras é de 430 MW (com Itaipu, a maior delas, sendo de 7.000 MW em sua porção brasileira), o maior parque eólico em operação no Brasil tem capacidade de 70 MW, que é mais do dobro da capacidade de uma pequena central hidrelétrica (até 30 MW) que, por sua vez, é 10 vezes maior que o maior parque solar fotovoltaico em construção no país.

25. Pode ser citado, por exemplo, o caso da planta de geração fotovoltaica de 3 MW em construção em Minas Gerais, a ser operada pela parceria CEMIG (empresa de geração e distribuição de energia) e Solaria (empresa fornecedora em regime *turnkey* de equipamentos solares).

26. Este é modelo de expansão prioritária da energia solar fotovoltaica na Alemanha. No Brasil, tal modelo ainda está em discussão nas instâncias legislativas e regulatórias.

se restringiria aos equipamentos de pequeno porte, gerando uma demanda global proporcional ao número de residências que adotarem o sistema de geração de energia renovável.

- **Sistemas de autogeração.** Compreende os sistemas de portes diversos, que têm em comum a geração de energia para consumo próprio, com a possibilidade ou não de comercialização dos excedentes produzidos. Os casos mais comuns são de plantas industriais integradas cujos subprodutos de uma linha de produção são insumos para a geração termoelétrica (por exemplo, usinas de açúcar e álcool que aproveitam o bagaço da cana como insumo para as pequenas termoelétricas integradas ao complexo da usina) e parques geradores operados por grandes empresas eletrointensivas (siderúrgicas, cimenteiras, etc.). Também podem fazer parte deste modelo de negócio os sistemas geradores implantados e operados por grandes estabelecimentos comerciais (por exemplo, *shopping centers*), que buscam obedecer a regras de uso do solo urbano ou promover ações de marketing associadas à sustentabilidade ambiental – mas que também podem representar reduções de custos de energia. Neste caso, os aparatos regulatórios com tarifas feed in poderiam estimular ainda mais a demanda. De qualquer forma, a demanda por equipamentos variaria conforme o porte do projeto de geração.

Definidos os modelos de negócio e apresentadas suas características para cada fonte de energia aqui estudada, a metodologia avança identificando os impactos de cada um deles na indústria de bens de capital no Brasil. Para isto, é preciso respeitar as características dos três principais conjuntos de equipamentos definidos anteriormente, a saber:

Equipamentos para captação, isto é, o conjunto de equipamentos responsáveis por captar a energia em sua forma primária e "conduzi-la" aos equipamentos que a transformarão em energia elétrica. Note que, no caso da captação, podem ser necessários não apenas equipamentos mecânicos, mas também obras civis (por exemplo, barragens, torres) ou ainda processos de coleta e processamento prévio de resíduos orgânicos.

Equipamentos para geração de energia elétrica, ou seja, equipamentos que convertem a energia captada (hidráulica, solar, orgânica, eólica) em energia elétrica. Destacam-se aqui as turbinas e os geradores, por exemplo.

Equipamentos para ligação e controle, incluindo aqui os eventuais equipamentos de armazenagem de energia e equipamentos de ligação à rede. Neste caso, quase sempre, os equipamentos são compatíveis com qualquer uma das fontes primárias e com quaisquer equipamentos de geração. Destacam-se, por exemplo, inversores, transformadores, baterias, sensores, atuadores, SW embarcado, SW supervisório, interfaces de usuário e comunicação.

Por fim, procede-se uma hierarquização das opções de adoção e expansão de cada *modelo de negócio,* para cada tipo de fonte. Como será observado na seção seguinte, o estudo é da opinião de que os sistemas eólicos ligados à rede serão muito mais frequentes e possíveis no Brasil do que os sistemas eólicos instalados em residências ou comunidades isoladas. Por outro lado, esses sistemas isolados integrarão o cenário mais provável para a expansão da energia solar.

5.1. Modelos de negócio de energia solar fotovoltaica e os impactos na indústria de bens de capital

O caso da energia solar fotovoltaica é o de maior dificuldade de análise do impacto sobre a indústria de bens de capital no Brasil. Isto se deve pela incipiência quase absoluta do uso dessa fonte no Brasil. Segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL, operavam no país em dezembro de 2011 apenas seis usinas fotovoltaicas, com potência fiscalizada total de apenas 1087 kW,[27] uma parcela marginal do conjunto de 116 GW da potência fiscalizada total no Brasil.

A despeito do tamanho marginal, é impossível ignorar o imenso potencial fotovoltaico do Brasil, graças não apenas às altas taxas de insolação, mas também ao custo da terra. A queda dos preços dos equipamentos solares pode tornar o uso dessa fonte muito mais comum do que no presente momento. No entanto, num horizonte de uma década, há uma grande probabilidade de que o modelo de negócio predominante no Brasil seja o de sistemas isolados, com a energia fotovoltaica substituindo ou complementando os grupos geradores a diesel em comunidades rurais isoladas.

Os demais sistemas dependem, essencialmente, dos marcos regulatórios. A aprovação de arranjos de *net metering* e/ou de tarifas *feed in* poderia estimular a demanda por equipamentos em residências de alto

27. Destaca-se a usina de Tauá, no Ceará, de propriedade da MPX, com potência fiscalizada de 1.000 kW. As demais usinas, quase todas pequenas unidades para teste, somam apenas 87 kW.

padrão (mas não pode ser ignorado o potencial de grandes complexos residenciais populares subsidiados pelo Estado)[28] e, sobretudo, em grandes estabelecimentos comerciais, sujeitos a regulamentos de uso do solo urbano. É por esta razão que esse modelo está classificado em 2° lugar no potencial de expansão no Brasil.

Por fim, o sistema mais distante de expansão da energia fotovoltaica no Brasil são os grandes parques solares comuns, por exemplo, em países como a Itália. O custo da energia hidrelétrica e as condições favoráveis para a expansão da energia eólica (em termos de disponibilidade natural, marco regulatório, incentivos fiscais e financiamento) poderão retardar o uso da energia solar nas operações de maior porte.

De qualquer forma, o tamanho do mercado para equipamentos de captação, geração, ligação e controle ligados à energia fotovoltaica ainda será muito pequeno na próxima década. Por esta razão, a pesquisa entende que tal demanda incipiente será atendida, majoritariamente, por importações. Como apontado anteriormente, há esforços nacionais para a produção de silício grau solar (pela rota metalúrgica) e para a posterior fabricação de células, placas, módulos e painéis fotovoltaicos. Os fabricantes nacionais (tais como a Tecnometal) ainda estão em estágio inicial de fabricação de placas e módulos, com alto conteúdo importado.

Vale ressaltar, por fim, que o tamanho ainda diminuto da demanda por equipamentos fotovoltaicos não pode impedir o desenvolvimento futuro do segmento no Brasil. Em todos os países onde a energia solar ampliou sua participação na matriz energética houve um forte apoio político e jurídico. Não há motivos para o Brasil não incentivar o uso da energia fotovoltaica, instituindo um marco regulatório em que se permitam tarifas diferenciadas de *feed in* e, associadas a esta política de sustentabilidade, se implementem políticas de compras que estimulem a oferta nacional dos equipamentos. O caso bem-sucedido da energia eólica serve de exemplo para um crescimento não esperado (e acelerado) da demanda por equipamentos elegíveis ao FINAME.

A **Tabela 5.1** a seguir sintetiza a análise anterior, apresentando as características dos três modelos de negócio associados à energia fotovoltaica no Brasil. Já a **Tabela 5.2** destaca os impactos esperados para cada conjunto de equipamentos (captação, geração e distribuição/controle) em cada um dos modelos de negócio que são, por sua vez, hierarquizados na última linha desse quadro.

28. Neste caso, o uso de instrumentos de poder de compra, estimulados por uma escala significativa de encomendas, poderia fomentar a demanda por equipamentos produzidos no Brasil, por exemplo.

Tabela 5.1 - Características dos modelos de negócio selecionados aplicados à energia fotovoltaica

Variável	Modelo de negócio		
	Parques solares ligados à rede	Sistemas isolados/residenciais	Autogeração
Escala	Até cerca de 10 MW	Poucos módulos por unidade	Muitos módulos por unidade
Demandante	Grandes operadoras (geração e/ou distribuição)	Famílias (demanda social e demanda residencial)	Grandes edifícios comerciais (ex: shopping centers); estádios
Ofertante do equipamento	Instalação turnkey por grandes empresas estrangeiras	Pequenos fabricantes/montadores, empresas de serviços (compradoras de equipamentos no atacado, representante de grandes fabricantes mundiais)	Empresas estrangeiras, empresas de serviços (compradoras de equipamentos no atacado, representante de grandes fabricantes mundiais)
Competitividade da fonte de energia	Ainda pouco competitiva, pode ser viável para a autogeração (ex: Cemig Distribuidora)	Tarifa social Pode ser viável com net metering (e algum incentivo para a amortização)	Pode ser viável com net metering e tem grande apelo de marketing
Investimento e comércio exterior	Pode atrair IDE, certamente aumentará as importações	Aumento de importações	Aumento de importações

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.2 - Modelos de negócio selecionados aplicados à energia fotovoltaica e os impactos na indústria de bens de capital brasileira

Variável	Modelo de negócio		
	Parques solares ligados à rede	Sistemas isolados/residenciais	Autogeração
Impacto na IBK brasileira, se o potencial se realizar	Equipamentos para captação: demanda baixa; as importações são mais prováveis, ainda que haja espaço para margem de preferência Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: demanda baixa por equipamentos nacionais	Equipamentos para captação: demanda baixa, espaço para margem de preferência, mas grande aumento de importações Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: demanda marginal por equipamentos nacionais	Equipamentos para captação: só importações Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: demanda marginal por equipamentos nacionais
Potencial no Brasil	Espaço para pequenos parques (efeito demonstração, por exemplo Solaria/Cemig)	Isolados: bastante possível; substituição de geradores a diesel Residenciais: ainda pouco prováveis	Há espaço para crescimento: economia verde e estatuto da cidade
Ordenamento do potencial	3º	1º	2º

Fonte: elaboração própria.

5.2. Modelos de negócio de energia eólica e os impactos sobre a indústria de bens de capital

A expansão da energia eólica no Brasil tem sido bastante significativa. Em 2005, o país tinha pouco menos de 30 MW de potência eólica instalada. Em 2011, eram aproximadamente 1.320 MW em 66 parques eólicos. Como foi analisado no Capítulo 3, a expansão dessa fonte renovável se deu pela conjunção dos seguintes fatores:

- Ampla disponibilidade de ventos constantes e velocidade necessária em regiões com regimes de ventos complementares (Nordeste e Sul). Além disto, os regimes de vento tendem ser complementares ao regime de chuvas (e abastecimento dos reservatórios hidráulicos);
- O regime de incentivos fiscais favoráveis ligados ao PROINFA e outros incentivos relacionados à isenção ou à desoneração de IPI e ICMS reduziu fortemente o custo dos equipamentos, tornando os projetos de geração de até 70 MW bastante competitivos, tanto para os sistemas ligados à rede quanto, mais recentemente, para os sistemas de autogeração;
- Ampla disponibilidade de recursos do FINAME do BNDES para os equipamentos com alto conteúdo nacional.

Por essas razões, o modelo de negócio de maior potencial, e que já vem concretizando-se, é o caso dos sistemas de porte elevado ligados à rede. Há potencial para o uso de equipamentos de menor porte em sistemas isolados e mesmo em modelos de autogeração, mas, no entendimento da pesquisa, dificilmente tais modelos superarão o potencial e a importância dos parques geradores de grande escala, operando com equipamentos de grande porte (torres superiores a 50 m, rotores de 80 m de diâmetro e geradores de 3 MW).

No caso da energia eólica, dominada por este modelo que, ademais, oferece um grande incentivo para a produção nacional de equipamentos, os impactos sobre a indústria de bens de capital brasileira já vêm sendo bastante significativos. Mantidos os incentivos – incluindo algum grau de proteção comercial –, a produção local de todos os conjuntos de equipamentos poderá ser ainda mais significativa. As empresas de capital estrangeiro que comandam a produção brasileira dominam a tecnologia e conseguem produzir localmente com competitividade.

O caso da energia eólica é um exemplo de como o estímulo para a implantação de um modelo de negócios de energia alternativa ensejou a demanda por equipamentos em todos os conjuntos considerados, da captação ao controle, passando por aerogeradores de grande porte, atraindo novos fornecedores e estimulando o investimento direto no desenvolvimento de uma cadeia local de BK no país.

As **Tabelas 5.3** e **5.4** a seguir sintetizam essa análise e descrevem os modelos de negócio selecionados e suas características aplicadas à energia eólica, além de hierarquizá-los e analisar os impactos na indústria de bens de capital no Brasil.

5.3. Modelos de negócio de energias renováveis "tradicionais" e os impactos na indústria de de capital

As fontes de energia renovável associadas às chamadas Pequenas Centrais Hidrelétricas e às pequenas usinas termoelétricas alimentadas por resíduos orgânicos (biomassa) foram agrupadas neste conjunto de energias "tradicionais". Tradicionais porque incorporam equipamentos e tecnologias relativamente maduros e difundidos, em que apenas mudanças incrementais são observadas. Também, neste caso, é marcante a convivência de empresas de pequeno porte (em especial, no caso de equipamentos para PCHs) com grandes empresas (Voith Hidro, Siemens, Dedini, por exemplo).

Os modelos de negócios e os impactos na indústria de bens de capital brasileira, no entanto, serão analisados de maneira desagregada nas duas subseções a seguir.

5.3.1. Modelos de negócio aplicados à biomassa e os impactos na indústria de bens de capital

A expansão das usinas termoelétricas alimentadas por biomassa é relativamente recente. Como vimos no Capítulo 3, essa expansão está quase que totalmente associada à proliferação de usinas integradas (convertidas ou novas) de açúcar e álcool.

Tabela 5.3 - Características dos modelos de negócio selecionados aplicados à energia eólica

Variável	Modelo de negócio		
	Sistemas ligados à rede	Sistemas isolados/residenciais	Autogeração
Escala	5 a 50 MW	10 a 50 kW 0,5 – 2,5 kW (residenciais)	Indústrias eletrointensivas
Demandante	Grandes operadoras (geração e/ou distribuição)	Demanda social em comunidades isoladas Condomínios e residências	Empresas estrangeiras e nacionais, instaladas no Brasil (aerogeradores, torres, pás, partes e peças) com *turnkey*
Ofertante do equipamento	Empresas estrangeiras e nacionais, instaladas no Brasil (aerogeradores, torres, pás, partes e peças) com *turnkey*	Empresas de serviços (compradoras de equipamentos no atacado, representante de grandes fabricantes mundiais); oportunidade para empresas nacionais de base tecnológica	Viabilidade crescente com redução nos custos A sazonalidade e a intermitência podem ser resolvidas com o net metering
Competitividade da fonte de energia	Bastante competitiva, em um nível semelhante ao das hidrelétricas de médio porte	A sazonalidade dos ventos é quase um impeditivo de sua viabilidade como fonte exclusiva	Atração de IDE (curto prazo) e expansão das exportações (médio prazo)
Investimento e comércio exterior	Atração de IDE (curto prazo) e expansão das exportações (médio prazo)	Aumento de importações	Indústrias eletrointensivas

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.4 - Modelos de negócio selecionados aplicados à energia eólica e impactos na indústria de bens de capital brasileira

Variável	Modelo de negócio		
	Sistemas ligados à rede	Sistemas isolados/residenciais	Autogeração
Impacto na IBK brasileira, se o potencial se realizar	Equipamentos para captação: demanda elevada, com fornecedores já estabelecidos ou em estabelecimento no Brasil Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: idem, só que com menor intensidade no que se refere ao controle da energia	Equipamentos para captação: baixa demanda, mas com espaço para atendimento a partir da oferta local Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: demanda marginal	Equipamentos para captação: Atendimento pela produção doméstica Equipamentos para geração: Aumento no índice de nacionalização Equipamentos de ligação e controle: potencialmente maior no caso de integração ao sistema interligado de energia
Potencial no Brasil	Elevado potencial; indústria em expansão em níveis competitivos, inclusive quando comparada às fontes hidráulicas	Isolados: médio potencial (substituição/complementação de geradores a diesel) Residencial: limitado a segmento imobiliário de alta renda	Grande potencial. Prazos e dificuldades menores com relação às PCHs
Ordenamento do potencial	1º	3º	2º

Fonte: elaboração própria.

Existem atualmente 340 usinas abastecidas por bagaço de cana-de-açúcar, cuja produção de eletricidade alimenta a planta de açúcar e álcool, e ainda gera excedentes comercializados no mercado livre de energia (energia *spot*). Essas usinas de bagaço de cana têm uma potência instalada de quase 7.000 MW ou 80% do total da potência associada a usinas cujo combustível térmico é a biomassa.

Ou seja, o modelo de negócio já dominante no Brasil é o de autogeração (ou cogeração), concentrado no segmento de açúcar e álcool, e no de papel e celulose. Como a escala destes empreendimentos têm crescido, espera-se que, cada vez mais, o modelo de autogeração (1º potencial) se confunda com o modelo de sistemas ligados à rede (2º potencial), uma vez que a comercialização do excedente terá grande importância no faturamento e na rentabilidade desses empreendimentos industriais integrados.

É claro que há potencial para a expansão em sistemas isolados, em especial em fazendas e estações de tratamento de resíduos urbanos (lixo e esgoto), mas o grosso da demanda por equipamentos virá dos sistemas de maior porte de autogeração e ligação à rede.

Os impactos na indústria de bens de capital brasileira continuarão significativos, uma vez que a *expertise* e a competitividade brasileiras no projeto, montagem e instalação *turnkey* de plantas integradas para o processamento da cana-de-açúcar são bastante difundidas. Ao dominar grande parte da tecnologia, incluindo o projeto, tais empresas integradoras brasileiras (a Dedini é o caso mais bem acabado) têm uma forte propensão a selecionar fornecedores locais, o que torna a cadeia produtiva ligada à produção e à montagem de usinas de cana (com módulo de cogeração de biomassa) bastante densa.

Vale ressaltar, entretanto, que é crescente a ameaça de importações predatórias neste segmento, uma prática que deve ser combatida não apenas pelos instrumentos tradicionais de defesa comercial, mas também por ações de incentivos ligadas às margens de preferências definidas pelo marco regulatório da energia.

Nas **Tabelas 5.5** e **5.6** a seguir são apresentadas as sínteses analíticas dos modelos de negócios aplicados à biomassa, com destaque para o bom potencial de demanda por equipamentos nacionais, conforme foi analisado acima.

Tabela 5.5 - Características dos modelos de negócio selecionados aplicados à biomassa

Variável	Modelo de negócio		
	Sistemas ligados à rede	Sistemas isolados/residenciais	Autogeração
Escala	Variável	Pequena, atendimento à demanda circunscrita	Variável
Demandante	Grandes operadoras (geração e/ou distribuição)	Demanda social	Usinas de cana-de-açúcar, grandes consumidoras de energia com disponibilidade de biomassa como subproduto dos processos industriais (ex: empresas de papel e celulose)
Ofertante do equipamento	Empresas nacionais e estrangeiras	Empresas nacionais e estrangeiras	Empresas nacionais e estrangeiras
Competitividade da fonte de energia	Com níveis de competitividade semelhantes aos das PCH e inferiores aos da energia eólica	Tarifa social	Competitiva, principalmente quando comparada ao custo de aquisição de energia via distribuidoras
Investimento e comércio exterior	Pouco impacto na atração de IDE e nas importações	Pouco impacto na atração de IDE e nas importações	Pouco impacto na atração de IDE e nas importações

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.6 - Modelos de negócio selecionados aplicados à biomassa e os impactos na indústria de bens de capital brasileira

Variável	Modelo de negócio		
	Sistemas ligados à rede	Sistemas isolados/residenciais	Autogeração
Impacto na IBK brasileira, se o potencial se realizar	Equipamentos para captação: demanda atendida por equipamentos nacionais, com crescente ameaça de equipamentos chineses Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: idem	Equipamentos para captação: demanda atendida por equipamentos nacionais, com crescente ameaça de equipamentos chineses Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: demanda marginal	Equipamentos para captação: demanda atendida por equipamentos nacionais, com crescente ameaça de equipamentos chineses Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: idem
Potencial no Brasil	Elevado, principalmente para consumo próprio e comercialização do excedente Ressalva: disputa pela biomassa da cana-de-açúcar no caso de efetivação comercial do processo de hidrólise enzimática	Com alguma viabilidade, desde que haja disponibilidade suficiente e um custo próximo de zero de biomassa	Elevado potencial: retrofit e adoção de processos em grandes consumidores de setores específicos
Ordenamento do potencial	2º	3º	1º

Fonte: elaboração própria.

5.3.2. Modelos de negócio aplicados a PCHs e os impactos na indústria de bens de capital

Durante a análise da estatura da oferta no Brasil, realizada no Capítulo 3, foi observado que o potencial de usinas hidrelétricas de pequeno porte estava bastante subutilizado. Aparentemente, tal uso limitado dessa fonte de energia estava em desvantagens institucionais em relação a outras fontes, em especial no que diz respeito à energia eólica. De fato, ao contrário dos equipamentos para a energia eólica, os equipamentos para as PCHs não são beneficiados com regimes de isenção fiscal. Além disto, a morosidade para a validação de um projeto de PCH (portanto, seu risco de fracasso) é bem maior do que o caso da eólica ou mesmo da solar, o que também onera, em termos relativos, a competitividade destes projetos. A morosidade relativa está associada aos requisitos de inventário hidráulico e licenças ambientais que, aparentemente, são bem mais ágeis no caso da energia eólica.

Mesmo assim, é significativa a presença de usinas PCHs no Brasil. Entre 2006 e 2010, a potência instalada por PCHs cresceu a uma taxa anual média de 21,6%, atingindo quase 4.000 MW em 2011. A imensa maioria dessa potência é de propriedade de produtores independentes que se concentram no modelo de negócio aqui denominado de autogeração. Na verdade, as grandes protagonistas deste mercado são grandes empresas eletrointensivas que investem na verticalização da produção, internalizando, em seu arranjo patrimonial, usinas hidrelétricas de pequeno porte para a produção mais barata de seu principal insumo produtivo, a energia elétrica.

Recentemente, com o novo marco regulatório da energia elétrica, tais empresas independentes passaram a considerar a venda de energia no mercado *spot*, seja de excedentes gerados, seja de parcela não excedente. É por esta razão que a pesquisa definiu que o modelo de negócio de maior potencial dessa fonte de energia continuará a ser o de autogeração, seguido pelos sistemas de geração localizados, em especial em comunidades e estabelecimentos rurais.

No primeiro caso, a demanda por equipamentos e, portanto, o impacto na indústria de bens de capital no Brasil é de pequeno a médio, em especial porque a subutilização do potencial deve permanecer nos

próximos anos, não pela deficiência intrínseca da fonte energética ou da baixa competitividade dos equipamentos, mas pelos incentivos fiscais e tributários para outras fontes, com destaque para a eólica.

Tal como no caso dos equipamentos para a geração a partir de biomassa, a indústria brasileira destes bens de capital será atuante e poderá ser competitiva, especialmente se a demanda não for intermitente. É grande o número de empresas produtoras, tanto as de médio e pequeno portes (por exemplo, Mecamedi Wirz) quanto às de grande porte (VoithHidro). Também como no caso das termoelétricas de biomassa, parece haver uma concorrência crescente com turbinas e demais equipamentos GTD importados, fatos que se evidenciam nas **Tabelas 5.7** e **5.8** a seguir.

Tabela 5.7 - Características dos modelos de negócio selecionados aplicados às PCHs

Variável	Modelo de negócio		
	Sistemas ligados à rede	Sistemas isolados	Autogeração
Escala	De 1 MW até 30 MW	Menos de 1 MW	De 1 MW até 30 MW
Demandante	Operadoras (geração e/ou distribuição)	Fazendas, comunidades isoladas	Grandes consumidores de energia
Ofertante do equipamento	Instalação *turnkey* por grandes empresas instaladas no Brasil, estrangeiras e nacionais	Pequenos e médios produtores	Instalação *turnkey* por grandes empresas instaladas no Brasil, estrangeiras e nacionais
Competitividade da fonte de energia	Competitividade semelhante à energia oriunda da biomassa, inferior às energias de fonte eólica e de médias e grandes centrais hidrelétricas	Relativamente competitiva	Competitiva, principalmente quando comparada ao custo de aquisição de energia via distribuidoras, mas menos que a eólica
Investimento e comércio exterior	Pouco impacto na atração de IDE e nas importações	Baixo impacto	Pouco impacto na atração de IDE e nas importações

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.8 - Modelos de negócio selecionados aplicados às PCHs e os impactos na indústria de bens de capital brasileira

Variável	Modelo de negócio		
	Sistemas ligados à rede	Sistemas isolados/residenciais	Autogeração
Impacto na IBK brasileira, se o potencial se realizar	Equipamentos para captação: demanda atendida por equipamentos nacionais, com crescente ameaça de equipamentos chineses Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: idem	Equipamentos para captação: baixo potencial de demanda por equipamentos produzidos no Brasil Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: idem	Equipamentos para captação: média demanda atendida por equipamentos nacionais, com crescente ameaça de equipamentos chineses Equipamentos para geração: idem Equipamentos de ligação e controle: idem
Potencial no Brasil	No atual marco regulatório e de apoio fiscal, tem baixo potencial de expansão	Baixo potencial	Há espaço para crescimento
Ordenamento do potencial	3º	2º	1º

Fonte: elaboração própria.

5.4. Conclusões

Neste capítulo, foi proposta uma metodologia para a análise dos impactos na indústria de bens de capital a partir da ampliação do uso de fontes de energia renováveis. Para tal, foi proposta uma tipologia de modelos de negócios possíveis para cada fonte, estimando seu potencial de expansão nos próximos anos. Para cada modelo, haveria um impacto diferente na indústria de bens de capital no Brasil.

Os maiores potenciais estão associados aos equipamentos para a energia eólica, cuja produção no Brasil tem sido estimulada e continuará crescendo nos próximos anos em todos os conjuntos ou sistemas de equipamentos, da captação ao controle (ver quadro 5.9 para uma síntese). Ainda que tal produção nacional venha sendo realizada por empresas de capital estrangeiro, vale ressaltar que o marco regulatório e o conjunto de incentivos fiscais, tributários e de financiamento (via FINAME BNDES) vêm contribuindo para um maior adensamento local da cadeia produtiva, além de capacitar o país a exportar equipamentos e insumos (em especial, rotores e pás).

Por outro lado, equipamentos para biomassa e PCH, cuja produção local se consolidou nos anos 1980 e1990, têm observado uma evolução de demanda inferior ao potencial. Os impactos dos modelos de negócio de energias renováveis tradicionais têm sido modestos, sobretudo, por causa da perda de dinamismo no uso dessas fontes – que acabam concorrendo com a eólica, por exemplo. O caso das PCHs é mais complicado do que o caso dos equipamentos para a biomassa. Usinas de açúcar e álcool integradas e com módulos de cogeração ainda demandam grande quantidade de equipamentos nacionais, em especial porque há domínio da tecnologia, de projetos e da instalação de plantas em regime *turnkey*. Como é de praxe em casos semelhantes, a demanda por equipamentos nacionais tende a ser maior do que quando a tecnologia é de propriedade de empresas estrangeiras – nestes casos, o *vendor list* do integrador inclui, quase sempre, seus tradicionais *global suppliers*.

O caso da energia solar é bastante diferente. Tem havido um esforço, ainda incipiente, em aumentar a participação dessa fonte na matriz nacional. Da mesma forma, empresas locais têm esforçado-se

na tentativa de purificar o silício e produzir células e placas fotovoltaicas. Muito embora tais esforços tenham sido por demais incipientes, vale ressaltar que o potencial de geração fotovoltaica no Brasil é tão grande que justifica o apoio à consolidação do segmento no Brasil, estimulado através de políticas de desenvolvimento pré-competitivo, desenvolvimento tecnológico e inovador, proteção comercial, financiamento prioritário e mudança nos marcos regulatórios. Um sucesso semelhante ao caso da energia eólica é possível também no caso da solar fotovoltaica, como será analisado no próximo capítulo.

Tabela 5.9 - Síntese do impacto do potencial de demanda na indústria de bens de capital por fontes de energia renováveis

Aproveitamento do potencial de demanda de bens de capital				
Sistema de equipamentos	Potencial incipiente	Potencial subutilizado	Razoavelmente utilizado	Bastante utilizado e crescente
Captação	Fotovoltaica	PCH	Biomassa	Eólica
Geração	Fotovoltaica	PCH	Biomassa	Eólica
Ligação/controle	Fotovoltaico		PCH, Biomassa	Eólica

Fonte: elaboração própria.

6. Políticas públicas e desenvolvimento da Indústria Brasileira de Bens de Capital para Energias Renováveis

O objetivo deste capítulo é analisar as perspectivas de desenvolvimento da indústria de capital para energias renováveis. Para tal, serão analisados os segmentos de energia eólica, PCHs, energia solar fotovoltaica e biomassa.

Este item do estudo partirá da constatação, corroborada por experiências internacionais inclusive, de que a existência de políticas públicas de fomento é uma condição fundamental para o desenvolvimento do setor.

Como linha de argumentação, procurar-se-á compreender as perspectivas de desenvolvimento da indústria local de bens de capital para o setor em três passos. O primeiro deles consistirá numa breve análise da dinâmica recente de mercado para cada uma das fontes. Em seguida, o capítulo apresentará as principais transformações tecnológicas e os determinantes da competitividade em cada segmento. Por fim, serão analisados os desafios impostos ao desenvolvimento de cada segmento no Brasil e serão apresentadas algumas sugestões de políticas públicas para superar esses desafios.

Como analisado no Capítulo 5, a pesquisa demonstrou que o segmento de energia renovável, que apresenta maiores possibilidades de desenvolvimento no curto e médio prazos, é o de energia eólica. Por outro lado, a geração de energia elétrica a partir de PCHs tem enfrentado mais dificuldades no período recente.

No que diz respeito especificamente aos produtores de bens de capital, nota-se que a competitividade dos agentes locais é distinta segundo os segmentos, sendo mais elevada nas fontes hidráulicas e na biomassa, e em ascensão na eólica. Já o segmento de energia solar fotovoltaica ainda se encontra em fase de gestação, com a necessidade de construção de competências tecnológicas, produtivas e inclusive o nascimento/atração/consolidação de agentes empresariais.

Destaca-se também, em diversas passagens do capítulo, que a pressão competitiva por parte dos fornecedores de bens de capital chineses é uma ameaça crescente à indústria nacional e, portanto, deve ser enfrentada com políticas públicas de incentivo ao desenvolvimento tecnológico e produtivo nacional. Assim, tem-se um cenário no qual os diversos agentes locais projetam uma expansão na capacidade de produção – com alguma ressalva no segmento de PCHs – a fim de atender a demanda

crescente, mas que, em paralelo a essa expansão dos investimentos, tais agentes também estão bastante preocupados com seus respectivos *market shares*, dada a crescente ameaça dos fornecedores chineses.

Introdução

Ao analisar o processo histórico de emergência e consolidação de indústrias e atividades intensivas em alta tecnologia, tanto em economias centrais como periféricas, notar-se-á que esses processos raramente são estimulados apenas pela ação dos mecanismos de incentivo e das sinalizações derivadas da atuação das forças de livre mercado. Ou seja, em intensidades distintas, devido às especificidades das transformações tecnológicas em questão e dos contextos institucional e histórico nos quais essas transformações se desenvolvem, a atuação das políticas públicas se revela como um importante elemento condicionante desses processos.

Entre as diversas razões para justificar esta atuação das políticas públicas, destaca-se o grau elevado de incerteza tecnológica e financeira, associado aos processos de mudanças tecnológicas. Além disso, é possível justificar estrategicamente o apoio do Estado a estes segmentos pelo fato de serem atividades intensivas em tecnologia, que apresentam um alto dinamismo e têm uma elevada capacidade de gerar empregos qualificados e bem remunerados. E mais, são segmentos portadores de importantes instrumentos viabilizadores do aumento da produtividade em outros setores e, deste modo, de atuarem no sentido de impulsionar o aumento da competitividade da economia local no cenário internacional.

Assim, pode-se admitir que, *grosso modo*, o desenvolvimento local de indústrias e atividades intensivas em tecnologia é um pré-requisito para o aumento do grau de autonomia dos países nas dimensões tecnológica, econômica e até mesmo política no sistema internacional, ainda que esta relação entre tecnologia e autonomia nacional seja difusa e condicionada por um conjunto muito complexo de fatores interdependentes entre si.[29] É exatamente neste contexto que se compreende a importância estratégica das políticas públicas para o desenvolvimento competitivo da indústria brasileira de bens de capital para energias renováveis.

Com o intuito de compreender a importância das políticas públicas para o desenvolvimento da referida indústria brasileira de bens de capital

29. A maneira como são compreendidas as relações entre tecnologia, autonomia e desenvolvimento nacional neste trabalho fundamenta-se teoricamente na tradição Cepalina. Nessa tradição, a dependência tecnológica é vista como um dos elementos característicos do subdesenvolvimento e da condição de inserção periférica no sistema internacional.

para energia renovável, realizou-se um esforço de coleta de informações primárias a partir de entrevistas com representantes de alguns dos principais agentes, direta ou indiretamente relacionados ao setor.

Inicialmente, identificaram-se as principais empresas[30] atuantes em cada um dos segmentos, objetos de estudo deste capítulo, do relatório a partir da base de dados DATAMAQ da ABIMAQ e de portais de referência com atuação na apresentação de conteúdo acerca das energias renováveis.

A partir de então, realizou-se um grande esforço de identificação dos profissionais em posição de gerência e direção, aptos a versarem sobre a importância das políticas públicas para o desenvolvimento do setor, os quais foram entrevistados.[31]

Adicionalmente aos representantes empresariais, também foram entrevistados representantes de instituições com participação direta e indireta na elaboração das políticas públicas para o setor, tais como os Ministérios de Minas e Energia, do Desenvolvimento, Indústria e Comércio, da Ciência, Tecnologia e Inovação, e o BNDES.

Antes de buscarmos compreender o impacto das políticas públicas no desenvolvimento de cada segmento, cumpre apresentar como as diretrizes mais amplas das políticas energéticas brasileiras condicionarão as possibilidades de desenvolvimento específico das fontes de energias renováveis examinadas neste capítulo.

O grande condicionante inicial diz respeito ao fato da matriz energética brasileira já apresentar níveis de utilização de energias renováveis substancialmente mais elevados do que a média mundial, principalmente quando se observa a geração de energia elétrica – na qual o percentual de fontes renováveis ultrapassa 80% (segundo dados do Plano Decenal de Expansão de Energia – 2019 apresentados – PDE 2019).

Adicionalmente, como este perfil da matriz decorre fundamentalmente da elevada representatividade – principalmente no caso da energia elétrica – das grandes usinas hidráulicas, o desenvolvimento de fontes alternativas, tais como a eólica, PCH, biomassa e solar fotovoltaica, é balizado pela concorrência com uma fonte altamente competitiva em termos de custos de geração, em especial se for considerada a amortização das usinas mais antigas e de elevada escala.

30. Listadas no Anexo IV.

31. Conforme acordado com os entrevistados, os nomes de suas respectivas empresas serão omitidos por motivos de confidencialidade. No entanto, cumpre enfatizar que a grande maioria dos principais agentes de cada um dos segmentos foi entrevistada.

Assim, ao contrário do que ocorre em outros países cuja matriz energética tem baixa representatividade de energias renováveis, limpas e de baixo custo, os incentivos ambientais e econômicos (de curto prazo) para a adoção dessas fontes alternativas são relativamente mais intensos do que aqueles presentes no Brasil. O que não quer dizer, entretanto, que tais incentivos não possam e não devam ser construídos no Brasil; mas, vale ressaltar que como ponto de partida, eles são menos intensos devido às características de nossa matriz.

Tal fato se acentua na medida em que a orientação geral da política energética nacional tem como uma de suas bases de sustentação a modicidade tarifária. Neste cenário, segundo a própria leitura do Ministério das Minas e Energia (MME), a justificativa perante a sociedade da introdução de energias alternativas que apresentem custos mais elevados do que aqueles que vêm sendo praticados no mercado regulado (ver **Tabela 6.1**) encontra diversos entraves.

Tabela 6.1 - Faixas de custo médio do MW/h gerado, segundo fontes, 2011

Fonte	Faixa de custo
Solar fotovoltaica	R$ 400 a R$ 500
Eólica	R$ 100
Biomassa	R$ 130 a R$ 150
PCHs	R$ 130 a R$ 150
Médias e grandes hidrelétricas	R$ 80 a R$ 100

Fonte: elaboração própria com base em dados da pesquisa.

Apesar desta orientação geral atual, o próprio MME leva em consideração em suas políticas o fato de que a implementação de fontes alternativas necessitaria de certo incentivo inicial a fim de conseguir engendrar um ciclo virtuoso no qual o aprendizado tecnológico associado ao aumento das escalas levaria ao ganho de produtividade e ao aumento da competitividade perante as fontes já estabelecidas. Além disso, o próprio MME – assim como os demais ministérios que participaram do esforço da pesquisa – também deixou bastante claro nas entrevistas sua ciência a respeito da importância do desenvolvimento no Brasil da cadeia de bens de capital para essas fontes alternativas.

Outro condicionante importante levantado pelo MME, no que diz respeito à utilização de fontes alternativas, refere-se ao fato de que na maioria

dos casos, estas apresentam algum grau de sazonalidade e intermitência (como no que diz respeito à periodicidade da safra para a geração de energia a partir da biomassa, variação e qualidade dos ventos ao longo das diferentes estações do ano, coincidência entre a maior intensidade da incidência dos raios solares e os horários de pico de consumo de energia etc.). Assim, a preocupação com a segurança no abastecimento do sistema impõe certo limite de segurança nas participações isoladas de cada uma das fontes de energias alternativas no sistema – limite este que apresenta grandes variações para as distintas fontes.

Em síntese, o que se apreende a partir das diretrizes gerais da política energética nacional é que, pelo menos na próxima década, a grande contribuição das energias alternativas consiste em aumentar a diversidade de fontes na matriz energética brasileira e assim, atuar de maneira complementar na expansão desta matriz, a qual está associada fundamentalmente aos médios e grandes projetos hidrelétricos. Neste cenário, o debate acerca das políticas públicas e o desenvolvimento das fontes alternativas, ao menos no curto prazo, devem levar em consideração o seguinte contexto:

- Admitindo-se como ponto de partida a premissa da segurança na oferta, o principal instrumento para a contratação de energia no mercado regulado continuará sendo o preço mínimo.
- O eixo principal da expansão da oferta no sistema continuará sendo a concorrência entre as diversas fontes. Ou seja, a adoção de mecanismos de concorrência entre as fontes específicas para a venda de uma quantidade predeterminada de energia, tal qual aconteceu durante a vigência do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica[32] (PROINFA), se por ventura ocorrer, não se configurará na diretriz principal da expansão do sistema.
- A introdução das fontes alternativas na matriz terá como pré-requisito, portanto, o aumento de sua competitividade perante outras fontes já estabelecidas.

Apesar deste caráter complementar, as possibilidades de desenvolvimento ainda são grandes, dado que, segundo o Plano Decenal de Energia Elétrica – 2019, a expansão da capacidade instalada de energia

32. O objetivo principal para a instituição do PROINFA foi o aumento da participação das fontes de energia eólica, derivadas da biomassa e de pequenas centrais hidrelétricas na matriz energética brasileira.

elétrica no Brasil nos próximos 10 anos terá que superar os 70 mil MW, o que corresponde a uma expansão de mais de 60% da capacidade instalada em 2010 (de 113.327 MW).

Assim, tem-se um cenário no qual os diversos agentes locais projetam uma expansão na capacidade de produção – com alguma ressalva no segmento de PCHs –, a fim de atender a demanda crescente, mas, em paralelo a essa expansão dos investimentos,[33] tais agentes também estão bastante preocupados com seus respectivos *market shares*, dada a crescente ameaça dos fornecedores chineses.

Adicionalmente, vale destacar que o contexto apresentado anteriormente diz respeito basicamente aos condicionantes presentes no mercado de energia regulada. No mercado livre e na própria atividade de geração para consumo próprio, muitas vezes observa-se a presença de mecanismos de incentivos distintos, que não se restringem apenas ao custo do MWh gerado.[34] Entre esses incentivos, pode-se destacar:

- a diversificação das fontes de oferta e o estabelecimento de contratos com preços preestabelecidos para os consumidores no mercado livre;
- a proteção contra variações no preço para grandes consumidores em relação à contratação no mercado regulado;
- aproveitamento de subprodutos e outras externalidades nas atividades de cogeração – principalmente no caso da biomassa –, seja para consumo próprio, seja para a venda de excedente, entre outros.

Neste cenário, levando-se em consideração as condicionalidades e as oportunidades impostas pelas diretrizes estratégicas da política energética nacional, o próximo passo deste capítulo consiste em compreender de que maneira tais diretrizes, associadas a políticas públicas estabelecidas e àquelas passíveis de serem formuladas, podem contribuir para o desenvolvimento dos diversos segmentos das alternativas renováveis no Brasil e, consequentemente, para a IBKER.[35]

As seções seguintes analisam, justamente, o atual estágio e as perspectivas das políticas públicas que podem influenciar o desempenho da indústria de bens de capital para energias renováveis.

33. Conforme será apresentado com um nível de detalhamento maior a seguir, a percepção por parte de praticamente todos os entrevistados é que as atuais condições de financiamento – no que diz respeito a prazos e volumes – por parte do BNDES para a expansão da oferta nacional de energia elétrica é adequada.

34. Segundo a EPE, a autoprodução representa atualmente mais de 9% do mercado e crescerá aproximadamente 8,2% a.a. entre 2009 e 2019.

35. O Anexo V apresenta de forma resumida alguns condicionantes relacionados ao desenvolvimento da IBKER no Brasil.

6.1. Políticas públicas e bens de capital para energia solar fotovoltaica

O mercado de geração de energia solar fotovoltaica encontra-se em um estágio de desenvolvimento substancialmente inferior aos demais mercados analisados neste capítulo do relatório. Mesmo levando em consideração algumas experiências bem-sucedidas, como é o caso da Alemanha, pode-se afirmar que até mesmo em escala internacional a geração de energia solar fotovoltaica encontra-se em estágio inicial de desenvolvimento.

No que diz respeito aos aspectos tecnológicos, observa-se que ainda há grandes margens para o aumento da produtividade e a redução dos preços dos equipamentos. Este fenômeno, por sua vez, estaria relacionado aos avanços tecnológicos em uma variada gama de equipamentos, tais como painéis solares, conversores, inversores, etc. Apenas a título de ilustração de como há importantes espaços para o aumento da eficiência dos equipamentos a partir de avanços tecnológicos e do aumento da escala de produção, vale destacar que as estimativas de mercado colhidas a partir dos entrevistados por este capítulo apontam que cada aumento de 100% na produção de equipamentos voltados à energia solar fotovoltaica seria acompanhado da redução de preço do MWh gerado em cerca de 20%.

Em paralelo ao avanço nas tecnologias já existentes, cabe destacar que estão sendo gestadas novas gerações de produtos bastante diferentes daquelas vigentes no atual paradigma. Apesar do estágio muito embrionário, essas novas tecnologias, baseadas na utilização de nanomateriais, prometem ampliar significativamente a capacidade de captação do potencial da energia solar. Neste novo paradigma, seria possível que inúmeras superfícies (desde que revestidas de uma determinada nanopelícula), que recebem incidência solar, fossem capazes de absorvê-las e contribuir para a geração de energia elétrica.

Como é característico em todas as atividades onde o processo de desenvolvimento tecnológico ainda não está totalmente consolidado e há diferentes padrões concorrendo entre si, os mercados de equipamentos para energia solar fotovoltaica ainda estão conformando um ciclo virtuoso que associa incrementos de produtividade e redução de

custos. Como consequência, o que se observa, inclusive em escala mundial, é que o custo do MWh da referida fonte ainda é bastante superior ao das demais fontes já consolidadas.

Se o cenário apresentado já impõe dificuldades para a consolidação dos mercados no nível internacional, quando o objeto de análise é o mercado brasileiro, tais dificuldades intensificam-se ainda mais. Isso porque, conforme já foi apresentado anteriormente, a matriz energética local é abundante em energias baratas e renováveis (ao contrário de diversos países onde a energia fotovoltaica é mais competitiva, notadamente os europeus).

Desta maneira, a primeira constatação a ser levada em consideração neste capítulo, no que diz respeito à influência das políticas públicas no desenvolvimento da indústria de bens de capital para energia renovável, é que o mercado para energia solar fotovoltaica no Brasil ainda está em fase de gestação. Segundo o relato de entrevistados, tal mercado se assemelha hoje ao então estágio de desenvolvimento da energia eólica há cerca de 10 a 15 anos. Ou seja, os desafios[36] são completamente distintos dos apresentados por outros segmentos aqui examinados e estão relacionados a:

- regulamentação do mercado;
- construção de competências tecnológicas locais;
- análise da viabilidade econômica quando comparada a outras fontes de energia;
- decisão acerca do modelo de negócio a ser utilizado (geração distribuída ou em fazendas solares);
- atração, gestação e consolidação de agentes locais – sejam eles nacionais, sejam multinacionais etc.

O primeiro ponto a ser enfrentado a partir do exame desses desafios é a análise da viabilidade econômica da tecnologia e a conseguinte escolha do modelo de negócio a ser adotado. Com respeito a esta questão, os entrevistados por este trabalho afirmaram que no atual estágio de desenvolvimento tecnológico do setor – e face à competição com outras fontes –, a adoção de fazendas tecnológicas no Brasil seria inviável. A adoção do modelo de geração distribuída, suportados com mecanismos do tipo tarifas *feed in*, deveria ser o modelo a ser seguido no Brasil – tal

36. O Anexo V apresenta um resumo dos principais condicionantes para a promoção do segmento solar fotovoltaico.

qual o foi na Alemanha, mesmo que, inicialmente, apresente uma competitividade menor.

Nesse modelo, cada unidade produtora, normalmente um domicílio, realizaria trocas e/ou comercializaria o excedente de energia produzida com a rede. Uma vez que o preço do MWh para energia solar atualmente oscila em torno de R$ 400 a R$ 500, o custo de geração para o consumidor seria muito semelhante e até inferior ao custo de aquisição das distribuidoras.

No entanto, para que esse modelo se viabilize, devem ser enfrentadas limitações no que diz respeito à regulamentação e ao custo do investimento inicial (questões estas que serão analisadas a seguir).

Além das questões de mercado, outro ponto nevrálgico que envolve o desenvolvimento de energia solar fotovoltaica no Brasil é a construção de capacitações tecnológicas nacionais, criação, consolidação e/ou atração de firmas para o setor. Em suma, a construção deste segmento na indústria de bens de capital para energia renovável.

A partir das entrevistas feitas para este capítulo do relatório, observou-se que diversas empresas que atuam em segmentos distintos da IBKER estão atentas às possibilidades oriundas da energia solar. Muitas, inclusive, estão se organizando com o intuito de construir unidades de negócios no setor.

A fim de construir uma indústria local sólida e competitiva, são necessárias capacitações tecnológicas e produtivas em diversos subsegmentos, sendo que, em alguns deles, a economia brasileira apresenta uma notória deficiência. Num primeiro momento, cabe apontar que toda a demanda atual (mesmo que muito pequena) por silício grau solar, *wafers*, células e painéis/módulos é atendida pela importação. As poucas atividades realizadas no Brasil são apenas de montagem.

Apesar de se imaginar que a inexistência de fornecedores estabelecidos localmente deve-se à incipiência do mercado, cabe ressaltar que estes mercados são extremamente concentrados em escala global, exigem escalas de produção elevadíssimas, altos investimentos iniciais e sua maior parte da produção concentra-se na Ásia. Ou seja, mesmo

com uma virtual expansão sólida da demanda local, as dificuldades para a criação/gestação de empresas nacionais, ao menos nas etapas mais nobres da cadeia, são grandes.

Mesmo apresentando essas limitações, alguns entrevistados destacaram a competência nacional em projetos, conversores, eletrônica de potência, integração e controle. Adicionalmente, pode-se destacar que o pleno funcionamento da *smart grid* exige competências estabelecidas em automação e *software*, áreas nas quais há agentes nacionais competitivos, inclusive em escala internacional.

Levando em consideração o exposto até aqui, fica patente que o nascimento e o desenvolvimento do mercado local e de uma indústria local de bens de capital para energia solar fotovoltaica dependem fortemente de políticas públicas. Neste sentido, sugerem-se quatro medidas,[37] tanto para os usuários do bem de capital quanto para os produtores:

37. O Anexo V apresenta um resumo das ações relacionadas a essas medidas, além da indicação de gestores, formas de implementação e resultados esperados.

(i) Regulamentação e estabelecimento de uma smart grid.

Levando em consideração que o modelo de negócio mais promissor no Brasil é aquele de geração distribuída, o primeiro passo para a criação de demanda local por bens de capital para o segmento seria regulamentar a *smart grid*. A partir dessa regulamentação, seriam estabelecidas as regras de comercialização do excedente de energia na rede, estabelecendo tarifas de *feed in*, taxação, possibilidade de troca de energia, entre diversos outros fatores. Vale lembrar que, conforme já foi citado, mesmo no atual estágio de desenvolvimento tecnológico ainda embrionário, o custo de geração do MWh para o consumidor residencial é bastante competitivo, quando comparado com a tarifa paga às concessionárias.

Adicionalmente, também se incentivaria a autoprodução para estabelecimentos comerciais e industriais. Com relação aos primeiros, um fator adicional para a implementação destas tecnologias está associado às externalidades positivas advindas de um posicionamento ecologicamente correto, o que os tornaria menos sensíveis aos preços do que os demais consumidores. Não obstante, esses potenciais benefícios no esforço de regulamentação deveria levar em consideração as limitações com a dificuldade de garantir a segurança energética em um sistema

de geração distribuída e a necessidade de compatibilizar a viabilidade financeira para o consumidor da venda do excedente de energia gerada e a os impactos desta compra nos resultados operacionais das concessionárias. Outro ponto importante a ser destacado são os investimentos derivados da necessidade de atualização tecnológica das redes. Como forma de mitigar tais custos, sugere-se que haja um cronograma de implementação gradual do *net metering* e que o cumprimento desse cronograma seja uma pré-condição para a disponibilização de financiamento por parte de órgãos públicos, além de um dos requisitos para avaliar o desempenho das concessionárias.

(ii) Estabelecimento de um período de isenção tributária para os bens de capital do segmento.

Uma vez que se trata de um segmento praticamente inexistente, tal política não traria redução de arrecadação. Além disso, a isenção tributária atuaria no sentido de reduzir os custos dos investimentos a serem realizados e assim, incentivar o mercado local. Esses custos, segundo a estimativa dos entrevistados, estariam em torno de R$ 8 mil a R$10 mil para a instalação de um sistema capaz de gerar de 100 a 130 kWh/mês. Tomando como referência o custo do MWh de cerca de R$ 500 para o consumidor doméstico, o prazo para a amortização do investimento no Brasil oscilaria entre 10 e 16 anos.

As medidas de incentivo tributário foram adotadas em todos os países que lograram êxito na adoção de energia solar fotovoltaica, contribuindo decisivamente para a redução do tempo de amortização do investimento (que é da ordem de cinco a oito anos na Alemanha, segundo os entrevistados). Como contrapartida à isenção de impostos de importação para os componentes e produtos importados, deveriam ser estabelecidas cláusulas de transferência tecnológica e metas graduais de aumento do índice de nacionalização destes produtos e componentes.

(iii) Garantia de condições de financiamento adequadas à indústria nascente local, seja via BNDES ou Finep.

Assim como apresentado nas sugestões de políticas para as demais fontes de energia, a garantia de condições adequadas de financiamento é

fundamental para o nascimento e a consolidação de uma indústria local de bens de capital. Admitindo o fato de que tais condições, *grosso modo*, encontram-se presentes – conforme informado pelos entrevistados –, sugere-se apenas uma atenção maior a demandas associadas ao desenvolvimento tecnológico e à construção de capacitações locais, via linhas de inovação do próprio BNDES ou da Finep.

Sugere-se também que a comercialização de tais equipamentos ao consumidor residencial seja financiada em moldes semelhantes aos itens abrangidos pelo Cartão BNDES. Deste modo, com taxas reduzidas e prazos alongados, as limitações para o investimento inicial relativamente alto seriam, ao menos em parte, reduzidas.[38]

38. É ocioso dizer que o financiamento em condições adequadas também deveria estar disponível para os consumidores de equipamentos nas diversas outras fontes de energia renováveis, sejam eles para a geração de energia para o autoconsumo e a comercialização, sejam para um mix de ambos.

(iv) Estabelecimento de metas mínimas de utilização de energia solar fotovoltaica por parte do poder público e dos concessionários de serviços públicos.

Com a efetivação desta medida, ainda que tais metas sejam relativamente modestas, esperam-se dois grandes efeitos. O primeiro deles refere-se à sinalização à sociedade e ao mercado do comprometimento do poder público com tais tecnologias. O segundo está relacionado ao impulso inicial à demanda por bens de capital, o que atuaria no sentido de aumentar a atratividade do mercado brasileiro para fornecedores estrangeiros e potenciais fornecedores nacionais e de iniciar o processo virtuoso de aumento de escalas de produção e redução de custos dos equipamentos.

6.2. Políticas públicas e bens de capital para energia eólica

A energia eólica tem-se destacado recentemente tanto no cenário nacional quanto internacional. Esse destaque pode ser observado na expansão substancial da geração de energia a partir dessa fonte e em sua crescente competitividade no que diz respeito ao custo do MWh gerado, quando comparada inclusive com as fontes de energia já consolidadas.

Como grandes fatores responsáveis por esse aumento da competitividade, destacam-se os avanços tecnológicos relacionados ao aumento (a) da altura das torres, (b) diâmetro do rotor, (c) maior dimensão das

pás, (d) aumento da capacidade dos aerogeradores e (e) automação dos processos – com um conseguinte aumento da eficiência associado (não só, mas também) à possibilidade de modificar a inclinação das pás e a rotação do aerogerador em face às mudanças na direção dos ventos.

Além desta maior eficiência, todos os entrevistados do setor foram unânimes ao afirmar que as transformações recentes no mercado mundial também contribuíram para a redução do custo médio por MWh dos parques eólicos brasileiros. Segundo os entrevistados, o relativo desaquecimento dos mercados europeu e estadunidense fez com que os principais *players* mundiais se defrontassem com uma capacidade de sobreoferta de equipamentos.[39]

Ainda segundo os entrevistados, ao conjugar esse cenário de relativo desaquecimento externo dos impulsos iniciais do PROINFA com a expansão da energia eólica no mercado brasileiro e o elevado potencial dessa fonte de energia no Brasil,[40] o mercado nacional tornou-se estratégico para a dinâmica de acumulação das empresas de bens de capital do setor.

Fruto destas transformações de mercado, observou-se um movimento de atração das principais empresas globais do setor para o Brasil. Com a decorrente acentuação da concorrência no mercado doméstico e os esforços de escoamento do excesso de oferta mundial de equipamentos, os preços destes apresentaram uma tendência de queda relativamente significativa no período recente.

Além das contribuições dos avanços tecnológicos e da redução de custos dos bens de capital, nota-se claramente que as políticas públicas contribuíram para o incremento significativo da competitividade da energia eólica no Brasil e, por extensão, para o desenvolvimento da indústria local de bens de capital.

Inicialmente, como já fora citado, pode-se afirmar que os incentivos derivados da contratação de energia no mercado regulado no período de vigência do PROINFA contribuíram para:

- sinalizar aos ofertantes de bens de capital que as diretrizes da política energética nacional buscariam incentivar a adoção desta fonte de energia como forma de contribuir para a diversificação de nossa matriz;

39. O recente desaquecimento dos mercados europeu e estadunidense, além de ter impactos positivos na redução dos custos dos equipamentos, fez com que se observasse um grande movimento de atração dos fornecedores globais para o Brasil. Neste cenário, ao contrário do que se poderia inicialmente supor, a desaceleração nos mercados centrais não cria grandes oportunidades para a absorção de ativos externos por parte das empresas nacionais. Isso porque esse cenário reduz o potencial de acumulação das empresas nacionais no mercado doméstico (em um primeiro momento, devido à redução das margens). Além disso, também vale destacar que os principais drivers de expansão do segmento são os mercados asiático e brasileiro, o que reduziria a atratividade, ao menos parcialmente, dos ativos comerciais localizados nos mercados tradicionais (apesar dos ativos tecnológicos e dos ganhos associados à escala serem importantes).

40. O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro aponta um potencial de geração de 143 GW onshore, dos quais, mais de 50% nos estados da região Nordeste. Vale lembrar que as estimativas recentes, a partir das transformações tecnológicas observadas no setor e de outros métodos de avaliação, apontam que o potencial eólico brasileiro pode ser mais do que o dobro daquele apresentado no Atlas.

- incrementar a escala de produção das empresas já instaladas no Brasil;
- incentivar a atração de novos *players* globais (sejam eles empresas anteriormente não presentes no território nacional, sejam divisões de *windpower* de empresas aqui já estabelecidas); e
- melhorar as condições de financiamento – no que diz respeito à disponibilidade de recursos, adequação de prazos, custos etc. – de projetos via estruturação do programa de apoio financeiro do BNDES aos projetos constituídos no âmbito do PROINFA.

Neste mesmo contexto de estabelecimento de políticas públicas de incentivo às fontes alternativas de energia, a isenção de ICMS, IPI, PIS e COFINS para os aerogeradores configurou-se em mais um forte impulso à competitividade dessa fonte de energia e, consequentemente, à indústria de bens de capital localizada no Brasil. Por fim, porém não menos importante, ainda vale destacar os diversos incentivos tributários e de outra natureza dos governos estaduais para a implementação de parques eólicos. Como resultado deste processo, observou-se a centralidade do mercado brasileiro na estratégia de expansão de grandes empresas globais dedicadas ao segmento de *windpower*. Com vistas a aproveitar as oportunidades de um mercado novo e dinâmico, e potencializadas pelos incentivos públicos, tais empresas têm estruturado suas ações no país não apenas para o fornecimento de equipamentos, mas também para o provimento de soluções *turnkey* de grande porte para a geração. Algumas delas – como a argentina IMPSA –, além de ofertantes de equipamentos, também comercializam a energia elétrica produzida nos parques eólicos de sua propriedade.

A conjugação de todos os fatores descritos anteriormente fez com que o preço do MWh gerado a partir da energia eólica reduzisse significativamente desde os primeiros leilões realizados no arcabouço do PROINFA, alcançando menos de R$ 100 nos leilões de 2011. Em tais patamares de preço, vale destacar que a geração de energia eólica apresenta um nível de competitividade menor apenas do que as hidrelétricas de grande porte e, portanto, mais elevado que as demais fontes de energia alternativas tratadas neste estudo.[41]

Neste cenário, ao examinar o desempenho recente da energia eólica no Brasil, fica patente a importância e a efetividade das políticas públicas para o seu desenvolvimento. Levando em consideração as

41. Cumpre observar também que um efeito derivado desta redução significativa dos custos da energia eólica é a perda de competitividade relativa de outras fontes, tais como as PCHs (visto que a dinâmica dos leilões no mercado regulado fundamenta-se na modicidade tarifária). Esta questão será analisada ainda neste capítulo.

condicionalidades apresentadas no início deste item, no que diz respeito às diretrizes gerais da política energética nacional, à experiência recente de políticas públicas para tal fonte de energia e às perspectivas de desenvolvimento de tais atividades, este capítulo busca contribuir com algumas sugestões de políticas para o desenvolvimento da indústria nacional de bens de capital para energia eólica. Assim, buscou-se apresentar medidas que podem ser entendidas, *grosso modo*, como de incentivo à demanda, incentivo ao aumento da produtividade via desenvolvimento tecnológico e aumento da escala, incentivo ao adensamento da cadeia produtiva e à exportação. É evidente que tais propostas não visam esgotar o tema em questão.

Como sugestões,[42] tanto para os usuários do bem de capital quanto para os produtores, destacam-se:

42. O Anexo V apresenta, de forma resumida, as recomendações de medidas para a promoção da IBKER na fonte eólica.

(i) Estabelecimento de diretrizes de médio e longo prazos acerca da contratação de determinados volumes de energia elétrica derivada da fonte eólica associada a níveis pré-estabelecidos de preços por MWh.

Esta medida funcionaria como uma sinalização ao mercado do comprometimento das diretrizes estratégicas de expansão da utilização de energias de fonte eólica na matriz energética brasileira. Deste modo, seria importante incentivar o aumento da capacidade de produção da indústria nacional de bens de capital e viabilizar incrementos de produtividade por meio de aumento de escala. Adicionalmente, como os volumes a serem contratados de energia estariam associados a determinadas faixas de preço, tal medida se configuraria de certa forma como uma política de incentivo ao desenvolvimento tecnológico do setor. Assim, por exemplo, seria possível estabelecer que, para o ano t+5, o volume de energia contratada seria Y gigawatt/hora, caso o preço fosse reduzido em x% em comparação ao ano t; estabelecer-se-iam faixas sucessivas, com a quantidade contratada aumentando à medida que a redução de preços fosse maior.

(ii) Continuidade dos benefícios fiscais associados aos níveis de nacionalização dos equipamentos e às metas de exportação.[43]

43. Vale destacar que já há empresas nacionais que exportam parcela significativa de sua produção, inclusive para o mercado estadunidense.

Em virtude do nível de competitividade das energias derivadas de fontes hidráulicas no Brasil e da preocupação central com a modicidade

tarifária nos planos de expansão da oferta elétrica nacional, a garantia de manutenção dos incentivos fiscais (como, por exemplo, a isenção de IPI e PIS/COFINS) para os aerogeradores é um determinante importante para o aumento da participação das fontes eólicas na matriz brasileira e para o conseguinte desenvolvimento da indústria nacional de bens de capital para o setor. À medida que, como decorrência da medida proposta no item (i), a escala de produção e o grau de competitividade dos equipamentos nacionais aumentassem, seria possível estabelecer faixas de benefícios fiscais associados ao aumento do grau de nacionalização dos produtos e às metas específicas de exportação. Ou seja, além de ser uma política com impacto direto inicial na redução de custos e no aumento da competitividade, a busca pela continuidade dos benefícios se configuraria em um mecanismo de incentivo para o adensamento da cadeia produtiva nacional e a exportação de bens de alta tecnologia. Como efeito adicional, tais exigências contribuiriam para incentivar a produção doméstica frente à constante ameaça representada pela importação de bens de capital chineses.

(iii) Disponibilidade de programas de apoio financeiro via BNDES aos projetos associados à geração de energia eólica em condições adequadas – no que diz respeito à disponibilidade de recursos, adequação de prazos, custos, etc.

É ocioso dizer que a existência de condições adequadas de financiamento de empreendimentos na área de infraestrutura – principalmente no mercado brasileiro – configura-se como um (senão o principal) dos fatores determinantes do desenvolvimento da indústria de bens de capital. Neste cenário, a disponibilidade de programas de apoio financeiro via BNDES aos projetos associados à expansão da geração de energia eólica é fundamental para a viabilização das diretrizes propostas no item (i) destas sugestões de políticas. Adicionalmente a esta política de financiamento e da mesma forma que se propôs na sugestão de política anterior, poder-se-ia estabelecer faixas de custos de financiamentos associadas a metas específicas de nacionalização de equipamentos e até de exportação dos mesmos. Deste modo, mais uma vez, uma política de apoio direto traria consigo, via mecanismos de incentivo, esforços no sentido de promover o adensamento da cadeia produtiva nacional e a exportação de bens

de alta tecnologia. Por fim, a contrapartida do aumento do grau de nacionalização de equipamentos também reduziria o espaço para a importação de bens de capital de origem chinesa.

(iv) Incentivo à geração para o consumo próprio, notadamente em grandes complexos comerciais.

Apesar da instalação de aerogeradores com o objetivo de gerar energia eólica para o consumo próprio ter como grande fator limitante a qualidade do vento (velocidade, intermitência, etc.), em alguns grandes complexos comerciais (tais como *shoppings centers*, condomínios de alto luxo, *resorts*) ou até mesmo em alguns consumidores industriais localizados em regiões com boa qualidade de ventos, tal estratégia pode ser viável. É importante ressaltar que, a princípio, levando em consideração as atuais condições técnicas e de custo dos equipamentos, o efeito de curto prazo sobre a expansão da demanda seria reduzido. No entanto, a existência de uma regulamentação adequada no que diz respeito ao *net metering* e à disponibilidade de financiamentos (por exemplo, via cartão BNDES ou mesmo via Finame) é condição *sine qua non* para que haja sinalizações de mercado que incentivem o nascimento deste segmento de mercado. Ademais, vale destacar que mesmo que tais incentivos não sejam suficientes no curto prazo para reduzir significativamente os custos desses sistemas de autoconsumo, não se deve avaliar a viabilidade de implementação desses sistemas exclusivamente a partir da análise do custo do MWh gerado, uma vez que em diversos casos (principalmente em grandes complexos comerciais), muitas vezes os benefícios associados ao *marketing* ambiental derivado de sua implementação podem gerar externalidades positivas.

6.3. Políticas públicas e bens de capital para biomassa

Ao analisar as possibilidades de desenvolvimento da geração de energia a partir da biomassa no Brasil, uma primeira questão a ser considerada é a dimensão deste mercado. Quando se observa a participação desta fonte no total da matriz energética brasileira, nota-se que os derivados da cana – incluindo o etanol – são responsáveis por mais de 20% do total dessa matriz (EPE, 2010) e cerca de 5% da geração da energia

elétrica nacional. Ainda segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), esta participação alcançará o patamar de 8,5% em 2019, sendo responsável por 37% da expansão da energia em fontes renováveis no período entre 2009 e 2019. Apenas a título de ilustração, vale lembrar que a participação da energia eólica na matriz energética brasileira é inferior a 1%.

Assim, a primeira constatação ao se examinar o segmento é a de que se trata de um mercado bastante significativo e já consolidado. Deste modo, as análises acerca de suas possibilidades de desenvolvimento partem de um contexto bastante distinto daquele característico das fontes energéticas ainda em processo de consolidação, tais como a eólica e a solar fotovoltaica.

Todo este processo de consolidação de uma fonte de energia renovável em patamares bastante competitivos, é ocioso dizer, foi incentivado por políticas públicas de demanda e desenvolvimento tecnológico desde o último quartel do século XX com o estabelecimento do Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL). Como resultado, observou-se a conformação de uma indústria nacional de bens de capital competitiva, com competências tecnológicas avançadas – referência internacional em alguns casos – e que apresenta elevados índices de nacionalização tanto no que se refere à estrutura patrimonial quanto aos produtos.

O primeiro desdobramento destes avanços materializou-se no desenvolvimento em bases bastante competitivas de um combustível alternativo para motores a combustão interna, o etanol, cuja introdução na matriz energética – principalmente adicionado à gasolina – tem sido objeto de estudos em diversos outros países.

Em paralelo a este mercado de etanol a partir da cana-de-açúcar, outro *driver* importante para a expansão da participação da biomassa na matriz energética é a geração de energia elétrica nas mesmas usinas produtoras de etanol e açúcar[44].

Com uma representatividade de mais de 80% da capacidade instalada brasileira para a geração de energia elétrica a partir de biomassa, o bagaço da cana-de-açúcar tem-se configurado recentemente como um subproduto importante para o complexo sucroalcooleiro.

Tal fato, por sua vez, está intimamente associado à competência tecnológica da IBKER, uma vez que decorre de transformações tecnológicas

44. Apesar das análises apresentadas nesta seção muitas vezes apresentar como caso ilustrativo a biomassa derivada da cana-de-açúcar, todas as proposições de políticas expressas estão relacionadas ao desenvolvimento do segmento de biomassa inteiro.

relacionadas ao aumento da pressão das caldeiras e à implementação de processos de cogeração através do *retrofit* de usinas previamente estabelecidas.

Com a adoção desses processos de *retrofit*, diversas usinas habilitaram-se não só a gerar energia para o consumo próprio, como também para a venda do excedente. Assim, antes mesmo do aumento da produção da cana-de-açúcar e do aumento das escalas das unidades produtivas, ainda há um grande potencial para a expansão da geração de energia elétrica em usinas preexistentes a partir da modernização e da atualização de suas máquinas e equipamentos.

Apesar dos avanços tecnológicos recentes, os entrevistados enfatizaram que ainda há espaço para ganhos de produtividade nos bens de capital para o segmento. Esses ganhos estariam associados fundamentalmente ao aumento da pressão da caldeira, aumento das escalas de produção e melhoras nos processos (principalmente na eficiência do ciclo de geração de calor), e estão sendo incorporados rapidamente nos produtos disponibilizados para a cogeração. Outra tendência tecnológica destacada pela IBKER, que não se restringe ao segmento sucroalcooleiro, é o aumento da flexibilidade dos processos, com vistas à utilização das mais diversas fontes de biomassa.

Não obstante todos estes incrementos de produtividade que impulsionaram o processo de geração de energia via *retrofit* das usinas existentes, os entrevistados foram unânimes ao afirmar que a competitividade do segmento depende fundamentalmente do custo da biomassa utilizada. Em muitos casos, inclusive, mais do que a capacidade de geração de calor do material específico, o que determina sua utilização é a disponibilidade como subproduto a custo zero. Neste contexto, surgem algumas questões que podem impactar o desenvolvimento competitivo a médio e longo prazos da principal fonte de biomassa brasileira:

A demanda crescente por matéria-prima tem ocasionado a expansão das áreas de cultivo de cana-de-açúcar em direção a regiões cada vez mais distantes das usinas. Esse fato encarece o custo de "coleta" da biomassa e tende a reduzir a competitividade da fonte.

O avanço tecnológico em direção à utilização das técnicas de hidrólise enzimática, no médio prazo, faria com que houvesse uma

disputa pela utilização do bagaço e da palha da cana-de-açúcar – bem como de outras fontes de biomassa – para a utilização entre fins concorrentes. Como resultado, mais uma vez, observar-se-ia uma tendência de aumento dos custos da biomassa.

A preocupação com a competitividade da referida fonte intensifica-se quando se leva em consideração que o nível de competitividade da energia gerada a partir da biomassa foi ultrapassado recentemente pela fonte eólica. Atualmente, com o custo do MWh gerado entre R$ 130 a R$ 150, tal fonte apresenta um nível de competitividade semelhante ao das PCHs. Dada a diretriz central de contratação de energia via competição entre as fontes com vistas à redução do preço nos leilões, as questões apresentadas colocam-se como desafios para o desenvolvimento do segmento.

No entanto, cabe ressaltar que além do mercado de energia regulada, a produção para o consumo próprio ou até mesmo para a comercialização no mercado livre constitui-se em fontes importantes de expansão do segmento, principalmente pelo fato da maior parcela da energia produzida a partir da biomassa concentrar-se na mesma região dos principais mercados consumidores. Apesar de não ser o principal componente do mercado, vale lembrar que, segundo a EPE, a autoprodução representa atualmente mais de 9% do mercado e crescerá cerca de 8,2% a.a. entre 2009 e 2019.

Outros pontos importantes no que diz respeito ao desenvolvimento competitivo da geração de energia a partir da biomassa estão relacionados à sazonalidade da oferta.

Uma preocupação fundamental, levando em consideração a segurança energética nacional, é a garantia da oferta de energia. Tal preocupação acentua-se na medida em que, além das variáveis climáticas que podem afetar o nível de produção, o complexo sucroalcooleiro já trabalha com dois grandes grupos de produtos – etanol e açúcar – com mercados que apresentam níveis de demanda e preços muito instáveis.

Entretanto, uma vez que a safra de cana ocorre no mesmo período da estiagem na região Sudeste, nota-se que a sazonalidade faz com que haja uma complementaridade no regime hidrológico na maior região produtora de biomassa e consumidora de energia elétrica. Ou seja,

apesar da instabilidade dos mercados, a sazonalidade faz com que o pico de geração de energia elétrica coincida com o momento em que o potencial de geração de energia de fontes hidráulicas está reduzido.

Por fim, outro grande desafio[45] colocado para a expansão desta fonte de energia, debatido nos níveis internacionais, é a necessidade de fazer com que a expansão da área cultivada não tenha impactos negativos na oferta de alimentos e ocasione um aumento de preços dos mesmos, e também não seja viabilizada pela expansão da fronteira agrícola via desmatamentos.

45. O Anexo V apresenta um resumo dos principais condicionantes para o desenvolvimento do segmento de biomassa.

É exatamente com vistas a superar estes desafios, fomentando o desenvolvimento competitivo e aderente às diretrizes propostas na política energética nacional, que se apresentam a seguir algumas sugestões de políticas públicas[46] para o setor de IBKER – Biomassa (tanto para os usuários do bem de capital quanto para os produtores).

46. Ver Anexo V .

(i) Continuidade da atuação dos agentes da esfera pública nas ações de concentração empresarial no segmento.

Sugere-se que haja uma continuidade do estímulo, a partir da participação de agentes da esfera pública, tais como BNDES e Petrobrás, do movimento de consolidação já vigente no setor. Este capítulo justifica tal estímulo, inspirado em uma leitura schumpteriana, a partir da constatação de que há uma relação positiva entre o aumento do porte das empresas produtoras de energia a partir da biomassa e o aumento da produtividade do setor. Dada a elevada necessidade de investimentos e o aumento substancial do tamanho das plantas produtivas, a pulverização do setor em agentes de pequeno porte seria incompatível com os desafios impostos ao setor. Adicionalmente, a presença de *players* com dimensões financeiras e produtivas maiores também atuaria no sentido de facilitar a coordenação do setor (item fundamental quando o objeto das políticas públicas influencia a segurança energética nacional).

(ii) Tal qual foi sugerido para a fonte eólica, sugere-se o estabelecimento de diretrizes de médio e longo prazos acerca da contratação de determinados volumes de energia elétrica derivada da biomassa associada aos níveis pré-estabelecidos de preços por MWh.

A partir desta sugestão, derivam-se as mesmas constatações apresentadas anteriormente. O estabelecimento de diretrizes de médio e longo prazos funcionaria como uma sinalização para o mercado, incentivando o investimento e a demanda por bens de capital. Como a quantidade contratada de energia estaria associada a determinadas faixas de preço da energia, as políticas também tenderiam a incentivar o aumento da produtividade de toda a cadeia, inclusive a IBKER, seja via aprimoramentos tecnológicos, seja via aumento de escala. Deste modo, além de estar aderente à diretriz geral de garantia da modicidade tarifária, tal política incentivaria o produtor de BK via incremento de demanda principalmente das novas gerações de produtos e também o usuário, que teria uma demanda pela energia previamente garantida, caso alcançasse determinados níveis de preço. Como forma de garantir a sustentabilidade em longo prazo dessa política, seria importante garantir o real suprimento da energia contratada. Para tal, sugere-se que o processo de expansão seja gradativo e apresente adicionais de energia a ser contratada para cada empresa específica, caso as metas sejam cumpridas.

(iii) Disponibilidade de programas de apoio financeiro via BNDES aos projetos associados à geração de energia a partir da biomassa em condições adequadas – no que diz respeito à disponibilidade de recursos, adequação de prazos, custos, etc.

Mais uma vez, tal qual foi sugerido para as demais fontes, enfatiza-se a importância da disponibilidade de condições adequadas de financiamento para a viabilidade do desenvolvimento competitivo do segmento. Vale ressaltar também que, apesar da ênfase nesta proposição, praticamente a totalidade dos empresários entrevistados em todos os segmentos da indústria de bens de capital para energia renovável afirmou que as atuais condições de financiamento disponibilizadas pelo BNDES são bastante adequadas. Alguns deles, inclusive, destacaram a postura ativa do próprio banco ao sugerir e incentivar a realização de determinados projetos, disponibilizando para tal, o financiamento necessário. Já os usuários de

bens de capital também expressaram a mesma impressão e enfatizaram que além da postura do banco, a própria lógica dos leilões contribui para a disponibilidade de crédito – uma vez que os recebíveis derivados da contratação de energia podem ser utilizados como garantias.

Apesar da importância do financiamento, cabe destacar mais uma vez que seria interessante que fossem estabelecidas faixas de custos de financiamentos associadas a metas específicas de nacionalização de equipamentos e até de exportação dos mesmos. Assim, como já foi dito, os produtores seriam incentivados a promover o adensamento da cadeia produtiva nacional, a exportação de bens de alta tecnologia. Em contrapartida, o mercado local para seus produtos tenderia a aumentar face às metas de nacionalização. Por fim, nunca é demais dizer, tal medida tenderia a reduzir o espaço para a importação de bens de capital.

(iv) Continuidade da política recém estabelecida de isenção de ICMS – pelo Estado de São Paulo – para bens de capital necessários para o retrofit.

Levando-se em consideração o patamar de competitividade atual da biomassa frente à energia eólica e, principalmente, à energia hidrelétrica, a continuidade da medida recente de isenção de ICMS para os bens de capital necessários para o *retrofit* é um instrumento bastante importante tanto para o incremento da competitividade da fonte quanto para o aumento da demanda por parte do produtor de bens de capital. Além disso, vale ressaltar que já são utilizados mecanismos de redução fiscal para outras fontes alternativas, principalmente para a eólica. Assim, essa medida atua no sentido de, ao menos, reduzir a distância entre o preço médio em cada uma das fontes. No entanto, vale ressaltar que este estudo não defende a manutenção dessa política *per se*. Justifica-a por entender que uma redução temporária – principalmente se conjugada às outras medidas aqui descritas – teria efeitos diretos no aumento dos investimentos no setor, os quais contribuiriam para engendrar um ciclo positivo de incremento das escalas, aprimoramento tecnológico e aumento da produtividade. Neste sentido, defende-se que o governo do Estado de São Paulo estabeleça metas para o grau de nacionalização, exportação e principalmente redução do preço médio da energia ofertada por esta fonte como contrapartida para a isenção

do ICMS. Tal isenção contribuiria, então, para a queda do preço médio das tarifas e incentivaria avanços tecnológicos na indústria local. Operacionalmente, pode-se pensar no estabelecimento de faixas de redução do imposto associadas a cada uma das classes de metas expostas.

(v) Precificação dos custos de distribuição associados à utilização da rede e à perda de energia.

Em consonância com a centralidade da modicidade tarifária na política energética nacional, sugere-se que os menores custos associados à utilização da rede de distribuição e à perda de energia sejam computados ao calcular o preço total da energia gerada a partir da biomassa. Explica-se: como grande parte da oferta da energia derivada da biomassa encontra-se mais próxima aos grandes centros consumidores do que as hidrelétricas e os parques eólicos, os custos de utilização do sistema e perda de energia são menores. Deste modo, sugere-se que essa redução de custos seja levada em consideração quando há competição entre as diversas fontes nos leilões de energia regulada. Assim, caso a redução desses custos seja da ordem de 10% para um determinado empreendimento, quando comparado aos demais concorrentes, por exemplo, o preço de seu MWh entregue na rede poderia ser até 10% maior do que os concorrentes que o custo final para o sistema seria o mesmo. Neste cenário hipotético, para patamares inferiores aos 10% citados, o empreendimento em questão seria o vencedor do leilão.

Mesmo cientes das dificuldades de competição da energia derivada da biomassa com outras fontes no mercado de energia regulada, entende-se que as sugestões de políticas apresentadas atuariam no sentido de aumentar sua competitividade. Ainda que tal incremento não fosse suficiente para aumentar substancialmente a participação dessa fonte nos mercados de energia regulada, entende-se que haveria importantes benefícios indiretos na redução de custos para a geração de energia para a autoprodução e até mesmo para aquela comercializada no mercado livre.

6.4. Políticas públicas e bens de capital para PCHs

A partir dos relatos dos entrevistados constatou-se, de maneira geral, que o mercado de bens de capital para PCH encontra-se em uma situação relativamente complicada nos últimos anos. Tal fato decorre principalmente da dificuldade de se viabilizar novos projetos em face aos preços observados nos últimos leilões de energia regulada.

Conforme foi afirmado anteriormente, o nível de preço do MWh gerado a partir de uma PCH situa-se na faixa de R$ 130 a R$ 150, muito semelhante àquele observado nas usinas de biomassa, porém bastante superior aos cerca de R$ 80 a R$ 100 nas hidrelétricas de grande porte e R$ 100 nas fontes eólicas. Uma vez que um dos eixos centrais do processo de expansão energética nacional é a modicidade tarifária e a competição entre fontes distintas, as dificuldades enfrentadas pelo referido segmento tornam-se patentes.

Ao analisar este cenário, os entrevistados foram unânimes ao afirmar que as transformações recentes no segmento de energia eólica e a conseguinte redução significativa do preço do MWh gerado por essa fonte foram os principais fatores responsáveis pela erosão da competitividade das PCHs. Adicionalmente, também elencaram outros fatores que dificultam a competição[47] com outras fontes – notadamente a eólica. São eles:

- a concepção, construção e instalação de um parque eólico, segundo os entrevistados, é um processo menos custoso do que o de uma PCH, que tem impactos na competitividade das fontes. Assim, a complexidade dos estudos de impacto ambiental e a tramitação necessária para a concessão das licenças reduzem a atratividade desta fonte para os investidores privados perante as demais alternativas.
- apesar do elevado potencial nacional em fontes hidráulicas, segundo os entrevistados, a disponibilidade de projetos com melhor viabilidade técnica – com quedas d'água mais elevadas – está relativamente escassa. Ou seja, tem-se observado uma tendência de redução da altura das quedas, o que exige maior área de alagamento (fato que pode esbarrar nas limita-

47. O Anexo V apresenta os condicionantes relacionados à promoção do segmento PCH.

ções impostas pela regulamentação) ou diminui a capacidade de geração de energia para uma determinada turbina. Ambas as constatações reduzem a competitividade do segmento.

Além das limitações expostas acima, também se pode afirmar que na dimensão tecnológica, as perspectivas de incremento da competitividade das PCHs perante outras fontes são relativamente reduzidas. Isso porque, segundo os entrevistados, o grande incremento recente de produtividade se deu há cerca de seis anos, com avanços na área de automação e controle. A partir de então, dada a natureza relativamente estabilizada das tecnologias envolvidas, os aprimoramentos tecnológicos são essencialmente incrementais.

Neste cenário, as possibilidades de desenvolvimento, ao menos no curto prazo, para as PCHs parecem estar restritas à participação como uma fonte complementar na matriz energética brasileira. Como a lógica de expansão do sistema ainda está apoiada na construção de mega-hidrelétricas, os principais espaços a serem ocupados pelas PCHs seriam o abastecimento de determinados mercados pontuais e a construção de unidades para o autoconsumo por parte principalmente de indústrias eletrointensivas.

Apesar da leitura desta seção sinalizar perspectivas não tão pujantes para o segmento, cabe ressaltar que os impactos deste cenário na IBKER são relativamente pequenos. Essa constatação deve-se ao fato de que a grande maioria dos fornecedores de bens de capital para o segmento também o são para os grandes projetos de hidrelétrica. Deste modo, uma expansão no sistema que privilegie estes grandes projetos, apesar de diminuir a atratividade das PCHs, também garante a demanda por bens de capital para a geração de energia a partir de fontes hidráulicas.

Levando-se em consideração o cenário exposto, apresentam-se algumas sugestões de políticas com o intuito de fomentar o segmento (os usuários e os produtores de bens de capital). Tal qual foi apresentado anteriormente para as demais fontes já analisadas, as duas principais políticas estruturantes[48] seriam:

(i) Disponibilidade de programas de apoio financeiro via BNDES em condições adequadas – no que diz respeito à disponibilidade de recursos, adequação de prazos, custos, etc.

48. Ver Anexo V para obter as principais recomendações de medidas para a promoção da PCH.

(ii) Estabelecimento de diretrizes de médio e longo prazos acerca da contratação de determinados volumes de energia elétrica associada aos níveis pré-estabelecidos de preços por MWh.

Em termos gerais, pode-se afirmar que essas medidas são comuns a todos os segmentos da IBKER apresentados neste capítulo, com algumas exceções no que diz respeito ao segmento solar fotovoltaica (dado o caráter embrionário desta indústria). Uma vez que as implicações decorrentes destas ações já foram expressas duas vezes neste capítulo, julga-se desnecessário apresentá-las detalhadamente. Vale apenas ressaltar a importância vital do financiamento para a viabilização de projetos da área de infraestrutura energética e os impactos da segunda medida na previsibilidade dos investimentos, no aumento das escalas produtivas e no aprimoramento tecnológico.

Outro ponto importante a ser enfatizado aqui é que ao exigir contrapartidas em termos de índice de nacionalização, as medidas expostas anteriormente estariam protegendo a indústria local da crescente pressão competitiva chinesa. Segundo os entrevistados, a IBKER local para o segmento apresenta competências tecnológicas históricas, com níveis de nacionalização muito elevados. No entanto, apesar de tecnologicamente superiores aos fornecedores chineses, em muitos casos os preços dos equipamentos desses fornecedores é tão menor que sua adoção com o intuito de viabilizar a redução dos custos dos projetos torna-se atrativa.

(iii) Precificação de externalidades ambientais e da menor necessidade de utilização da rede de transmissão.

Como um dos principais diferenciais competitivos das PCHs é o seu impacto ambiental relativamente menor quando comparado a algumas outras fontes – inclusive as grandes hidrelétricas –, sugere-se que esse menor impacto seja precificado e permita que, nos leilões do mercado regulado, o preço do MWh gerado pelas PCHs leve em consideração essa precificação. Ademais, dada a característica de geração para o abastecimento de mercados específicos, tal qual se sugeriu para a biomassa, imagina-se que a menor necessidade de utilização da rede de transmissão também deva ser levada em consideração ao se estabelecer o preço de contratação da energia nos leilões. Tal medida, por sua vez, estaria completamente aderente à preocupação com a modicidade tarifária do

sistema – uma vez que o custo da energia paga pelo consumidor inclui, obviamente, os custos de distribuição rateados em todo o sistema.

6.5. Considerações finais

Ao examinar as perspectivas de desenvolvimento da indústria de capital para as energias renováveis, observou-se que tanto no Brasil quanto em todo o mundo a existência de políticas públicas de fomento é condição fundamental para o desenvolvimento do setor. Tal necessidade se expressa em graus distintos nos diversos segmentos, mas pode-se afirmar que, ao menos, dois pontos são comuns a todos eles: a disponibilidade de financiamento em condições adequadas e os incentivos via demanda.

A partir da análise exposta, observou-se que o segmento de energia renovável que apresenta maiores possibilidades de desenvolvimento no curto e médio prazos é o de energia eólica. Por outro lado, a geração de energia elétrica a partir de PCHs tem enfrentado dificuldades no período recente.

No que diz respeito especificamente aos produtores de bens de capital, nota-se que a competitividade dos agentes locais é distinta segundo os segmentos.

Assim, nas fontes hidráulicas e de biomassa, pode-se dizer que há um nível histórico relativamente alto de competitividade, com elevados níveis de nacionalização tanto nos produtos quanto na estrutura patrimonial.

Nas fontes eólicas, tem-se observado um movimento recente de adensamento da cadeia produtiva local. Entretanto, apesar da existência de empresas nacionais com destaque internacional, a maior parte da cadeia produtiva é controlada por filiais de multinacionais.

Por fim, a indústria de bens de capital para o segmento de energia solar fotovoltaica ainda encontra-se em fase de gestação, com a necessidade de construção de competências tecnológicas, produtivas e inclusive o nascimento/atração/consolidação de agentes empresariais locais.

A título de conclusão, vale destacar que, apesar do nível relativamente satisfatório de competitividade da indústria local de bens de capital para energias renováveis e das sugestões de políticas apresentadas para impulsionar essa competitividade, tem-se observado uma ameaça competitiva crescente por parte dos fornecedores chineses.

Anexo I
Listas de Tecnologias

Apresentação

Neste anexo são apresentadas as listas de tecnologias compiladas e validadas pelos especialistas do comitê técnico durante as oficinas de trabalho para cada uma das fontes de energia. Com base nessas listas foram elaborados os questionários da pesquisa de campo.

A - Lista de tecnologias para a energia eólica

1. Uso de modelos de pá mais adequado ao perfil de vento brasileiro, visando um melhor aproveitamento de velocidades mais baixas.
2. Uso de fibra de carbono, visando a confecção de pás mais leves e resistentes.
3. Uso de aerogeradores de pequeno porte (até 5 kW) do tipo savonius para a geração de energia elétrica em edifícios e casas.
4. Uso de aerogeradores de 10 kW em sistemas isolados.
5. Uso de aerogeradores de 50 kW.
6. Uso de aerogeradores de 100 kW.
7. Uso de torre autoportante para aerogeradores acima de 10 kW, visando minimizar custos.
8. Uso de materiais de alto desempenho para caixas de redução.
9. Uso de lubrificantes especiais para caixas de redução.
10. Uso de ligas especiais com parafusos de fixação de torres, nacelas e pás.
11. Uso de materiais de alto desempenho em sistemas de freio de emergência.
12. Uso de *monopile* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 – 60 m).
13. Uso de *jacket structure* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 – 60 m).
14. Uso de *gravity base structure* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 – 60 m).

15. Uso de *tripodstructure* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 – 60 m).

16. Uso de "plataformas flutuantes" em projetos de fundações de parques eólicos *offshore* para profundidades altas (60 – 900 m).

17. Uso de navios especiais para o transporte e a instalação de aerogeradores previamente montados e comissionados.

18. Uso de controle ativo de posicionamento em aerogeradores de pequeno porte para aumentar a eficiência na captação do vento (aerogeradores sem rabeta/leme).

19. Uso de fios de supercondutividade em geradores elétricos para a redução das perdas elétricas durante a geração.

20. Uso de controle ativo de potência do tipo pith para aerogeradores de pequeno porte.

21. Uso de controle ativo de freios em pás de aerogeradores de pequeno porte.

22. Uso de inversores inteligentes em sistemas híbridos solar-eólico-diesel para um gerenciamento mais inteligente das fontes de geração e controle de demanda.

23. Uso de conversores de potência na conexão com a rede para a redução de perdas e o fornecimento de energia em alta qualidade.

24. Uso de controladores de carga inteligentes no controle de carga e descarga das baterias para uma maior eficiência e redução de perdas.

25. Uso de analisadores de qualidade de energia integrados aos medidores de energia para um melhor monitoramento da geração e de seu desempenho na rede.

26. Uso de sistemas de controle inteligentes em grandes parques eólicos para a conexão com a rede elétrica.

27. Uso de conversores de potência para a compensação de reativos em grandes parques eólicos.

28. Uso da tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*) em aparelhos e equipamentos para a medição do vento para proporcionar uma maior acurácia na medição dos ventos em diversas alturas.

29. Uso de ímã permanente em neodímio para maquinas elétricas de alto desempenho.
30. Uso de baterias níquel-cádmio.
31. Uso de baterias níquel-zinco.
32. Uso de baterias chumbo-ácido com gel.
33. Uso de baterias chumbo-ácido AGM (*absorbed glass mat*).
34. Uso de tintas especiais em equipamentos elétricos e mecânicos *offshore* (partes acima do nível da água e partes submersas) para a proteção atmosférica.

B - Lista de tecnologias para a energia solar

1. Uso de rota química para a purificação do silício para a produção de células solares.
2. Uso de rota metalúrgica para a purificação do silício para a produção de células solares.
3. Uso de plasma térmico para a redução do quartzo de alta pureza para a produção de lâminas de silício para a produção de células solares.
4. Uso do método Czochralski para a produção de lingotes de silício.
5. Uso de solidificação direcional HEM (*Heat Exchange Method*) para a obtenção de bloco multicristalino para a produção de lingotes de silício.
6. Uso de solidificação direcional com lingotamento contínuo para a obtenção de bloco multicristalino para a produção de lingotes de silício.
7. Uso do método da fusão zonal flutuante para a obtenção de bloco multicristalino para a produção de lingotes de silício.
8. Uso do silício cristalino (monocristalino e multicristalino) para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos.
9. Uso do arsenieto de gálio para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos.
10. Uso do silício amorfo e microcristalino para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos.

11. Uso do telureto de cádmio para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos.
12. Uso dos compostos dos grupos I-III-VI (disselenato de cobre índio (CIS – CuInSe2), disselenato de cobre gálio índio [CIGS – Cu(InGa)Se2] e outros) para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos.
13. Uso de materiais orgânicos para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos.
14. Uso de módulos fotovoltaicos estáticos com concentração.
15. Uso de módulos fotovoltaicos com espelhos com concentração.
16. Uso de módulos fotovoltaicos com lentes com concentração.
17. Uso de eixo horizontal com orientação leste-oeste em sistemas de seguimento com rotação.
18. Uso de eixo horizontal com orientação norte-sul em sistemas de seguimento com rotação.
19. Uso de eixo polar com orientação norte-sul inclinado em sistemas de seguimento com rotação.
20. Uso de eixo vertical com orientação azimutal em sistemas de seguimento com rotação.
21. Uso de dois eixos controlados independentemente (vertical e horizontal) com orientação normal à radiação solar em sistemas de seguimento com rotação.
22. Uso de inversores autocomutados e chaveados por transistores IGBT para a ligação com a rede elétrica (CR).
23. Uso de inversores autocomutados e chaveados por tiristores GTO para a ligação com a rede elétrica (CR).
24. Uso de inversores autocomutados e chaveados por MOSFET para a ligação com a rede elétrica (CR).
25. Uso de inversores autocomutados e chaveados por transistores bipolares BT para a ligação com a rede elétrica (CR).
26. Uso de inversores comutados pela rede elétrica e chaveados por tiristores para a ligação com a rede elétrica (CR).
27. Uso de inversores comutados pela rede elétrica e chaveados por transistores IGBT para a ligação com a rede elétrica (CR).

28. Uso de inversores autocomutados com transformador de baixa frequência para a ligação com a rede elétrica (CR).
29. Uso de inversores autocomutados com transformador de alta frequência para a ligação com a rede elétrica (CR).
30. Uso de inversores autocomutados sem transformador para a ligação com a rede elétrica (CR).
31. Uso de inversores comutados pela rede elétrica com transformador de baixa frequência para a ligação com a rede elétrica (CR).
32. Uso de inversores autocomutados com saída em baixa tensão (100 VCA a 400 VCA) para a ligação com a rede elétrica (CR).
33. Uso de inversores autocomutados com saída em média tensão (1 kVCA a 35 kVCA) para a ligação com a rede elétrica (CR).
34. Uso de inversores comutados pela rede elétrica com saída em baixa tensão (100 VCA a 400 VCA) para a ligação com a rede elétrica (CR).
35. Uso de inversores comutados pela rede elétrica com saída em média tensão (1kVCA a 35 kVCA) para a ligação com a rede elétrica (CR).
36. Uso de inversores baseados em modulação senoidal por largura de pulso (PWM) para sistemas isolados.
37. Uso de controladores de carga do tipo contínuo (liga-desliga) para baterias.
38. Uso de controladores de carga do tipo pulsado (PWM) para baterias.
39. Uso de controladores de carga com seguidor do ponto de máxima potência (MPPT) para baterias.
40. Uso de controladores de carga com compensação de temperatura para baterias.
41. Uso de baterias chumbo-ácido AGM (absorbed glass mat).
42. Uso de baterias chumbo-ácido com gel.
43. Uso de baterias chumbo-ácido com eletrólito líquido.
44. Uso de baterias níquel-cádmio.

45. Uso de baterias níquel-zinco.

46. Uso de concentradores cilindro-parabólicos (*trough*) em sistema heliotérmico.

47. Uso de concentradores com refletores lineares fresnel em sistema heliotérmico.

48. Uso de concentrador com receptor central (torre) em sistema heliotérmico.

49. Uso de concentrador com discos parabólicos (*dish*) em sistema heliotérmico.

50. Uso de tecnologias de sais fundentes para o armazenamento de energia térmica com calor latente em sistema heliotérmico.

C - Lista de tecnologias para a biomassa

1. Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da hidrólise enzimática da biomassa.

2. Uso em célula a combustível de etanol direto de bioetanol obtido a partir da hidrólise enzimática da biomassa.

3. Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da hidrólise ácida da biomassa.

4. Uso em célula a combustível de etanol direto de bioetanol obtido a partir da hidrólise ácida da biomassa.

5. Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa.

6. Uso em célula a combustível de etanol direto de bioetanol obtido a partir da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa.

7. Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da fermentação/destilação da cana-de-açúcar.

8. Uso em motor de combustão interna de biodiesel obtido a partir da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa.

9. Uso em motor de combustão interna de biodiesel obtido a partir da pirólise da biomassa.

10. Uso em motor de combustão interna de biodiesel obtido a partir da transesterificação de óleos vegetais.
11. Uso em motor de combustão interna de diesel obtido a partir do gás de síntese.
12. Uso em motor de combustão interna de gasolina obtida a partir do gás de síntese.
13. Uso em uma célula a combustível de óxido sólido do biogás obtido a partir da digestão anaeróbica da biomassa.
14. Uso em motor de combustão interna de biogás obtido a partir da digestão anaeróbica da biomassa.
15. Uso em um sistema "reformador - célula a combustível de membrana polimérica" de biogás obtido por meio da digestão anaeróbica da biomassa.
16. Uso em um sistema "purificador - motor de combustão interna" de gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa.
17. Uso em uma turbina a gás do gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa.
18. Uso em um sistema "purificador - célula a combustível de membrana polimérica" de gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa.
19. Uso em um sistema "purificador - reformador - célula a combustível de óxido sólido" de gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa.
20. Uso em uma "célula combustível - membrana polimérica" de hidrogênio obtido através da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa.
21. Uso em uma "célula combustível - óxido sólido" de hidrogênio obtido através da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa.
22. Uso em uma "célula a combustível de metanol direto" de metanol obtido através da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa.
23. Uso em um ciclo stirling de calor obtido por meio da combustão da biomassa.

24. Uso em turbinas de queima externa (EFGT) de calor obtido por meio da combustão da biomassa.
25. Uso em motor a vapor (de pistão) de vapor obtido por meio da combustão da biomassa.
26. Uso em motor a vapor (de rosca) de vapor obtido por meio da combustão da biomassa.
27. Uso em microturbina a vapor do vapor obtido por meio da combustão da biomassa.
28. Uso no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) do vapor obtido por meio da combustão da biomassa e do gás natural.
29. Uso no Ciclo Rankine do vapor obtido por meio da cocombustão da biomassa e do carvão.
30. Uso nos Ciclos a Vapor Rankine do vapor obtido por meio da cocombustão da biomassa e do gás natural.
31. Uso em um Ciclo Rankine de vapor obtido por meio da combustão da biomassa.

D - Lista de tecnologias para PCH

1. Uso de turbinas hidráulicas do tipo Pelton para centrais de baixas rotações específicas (altas quedas e pequenas vazões) com 1 e 2 jatos.
2. Uso de turbinas hidráulicas do tipo Pelton para centrais de médias rotações específicas (altas quedas e médias vazões) com 3, 4 ou 6 jatos.
3. Uso de turbina Francis para centrais de baixas rotações específicas (Francis lenta).
4. Uso de turbina Francis para centrais de médias rotações específicas (Francis normal).
5. Uso de turbina Francis para centrais de altas rotações específicas (Francis rápida).
6. Uso de turbina Francis para centrais de altas rotações específicas (Francis dupla).
7. Uso de turbina axial (pás fixas) de altas rotações específicas (5 a 6 pás).

8. Uso de turbina axial (pás fixas) de muito altas rotações específicas (4 pás).
9. Uso de turbina axial (pás fixas) de altíssimas rotações específicas (3 pás).
10. Uso de turbina axial do tipo Kaplan (pás móveis) de altas rotações específicas (5 a 6 pás) com pás do rotor móveis e pás do distribuidor fixas.
11. Uso de turbina axial do tipo Kaplan (pás móveis) de altas rotações específicas (5 a 6 pás) com pás do rotor fixa e pás do distribuidor móveis.
12. Uso de turbina axial do tipo Kaplan (pás móveis) de altas rotações específicas (5 a 6 pás) com pás do rotor móveis e pás do distribuidor móveis.
13. Uso de turbinas Kaplan do tipo "S" com gerador externo a montante.
14. Uso de turbinas Kaplan do tipo "S" com gerador externo a jusante.
15. Uso de turbinas Kaplan do tipo "S" com gerador externo vertical.
16. Uso de turbinas Kaplan do tipo tubular com gerador externo a montante.
17. Uso de turbinas Kaplan do tipo tubular com gerador externo a jusante.
18. Uso de turbinas Kaplan do tipo tubular com gerador externo vertical.
19. Uso de turbinas bulbo com gerador interno.
20. Uso de turbinas bulbo com gerador externo.
21. Uso de turbinas bulbo com gerador interno do tipo PIT (poço).
22. Uso de conjunto hidrogerador tipo "straflo" (fluxo direto) com rotor do gerador solidário ao da turbina.
23. Uso de turbina não convencional de fluxo cruzado ou Michell-Banki.
24. Uso de turbina não convencional de bomba funcionando como turbina.

25. Uso de turbina não convencional Turgo.
26. Uso de turbina não convencional Francis do tipo turbilhão.
27. Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor axial.
28. Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor axial e tubo de sucção.
29. Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor Darrieus.
30. Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor helicoidal ou Gorlov.
31. Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor do tipo parafuso de Arquimedes.
32. Uso de turbina com caixa espiral de aço.
33. Uso de turbina com caixa espiral de concreto.
34. Uso de gerador convencional de rotação constante síncrono, com rotações superiores a 600 rpm.
35. Uso de gerador convencional de rotação constante síncrono inferior a 1 MW, de eixo vertical com rotações inferiores a 600 rpm.
36. Uso de gerador convencional de rotação constante do tipo hidrogerador (gerador síncrono, com baixas rotações).
37. Uso de gerador convencional de rotação constante assíncrono.
38. Uso de gerador convencional de rotação constante síncrono de ímã permanente.
39. Uso de gerador não convencional de rotação variável.
40. Uso de excitatriz rotativa.
41. Uso de excitatriz estática.
42. Uso de regulador de tensão.
43. Uso de sistema mecânico (óleo-hidráulico) com regulador de velocidade.
44. Uso de sistema analógico com regulador de velocidade.
45. Uso de sistema digital com regulador de velocidade.

46. Uso de sistema digital integrado (velocidade e de tensão) com regulador de velocidade.
47. Uso de operação assistida no sistema de supervisão da central.
48. Uso de operação desassistida no sistema de supervisão da central.
49. Uso de operação desassistida remota no sistema de supervisão da central.
50. Uso de tecnologia CLP no sistema de supervisão da central.
51. Uso de tecnologia totalmente digital no sistema de supervisão da central.
52. Uso de isolamento a seco em transformadores.
53. Uso de isolamento imerso em óleo em transformadores.
54. Uso de chaveamento manual.
55. Uso de chaveamento automatizado com controle à distância.
56. Uso de colunas oscilantes na geração de energia de ondas do mar.
57. Uso de flutuadores na geração de energia de ondas do mar.
58. Uso de geradores de energia cinética na geração de energia de ondas do mar.
59. Uso de geradores de energia potencial na geração de energia de ondas do mar.

Anexo II
Relatório da pesquisa de campo

Apresentação

Este anexo descreve a metodologia e os resultados da pesquisa de campo. Cabe destacar que os resultados aqui descritos foram submetidos ao comitê técnico para avaliação e validação dos mesmos. Para facilitar o entendimento, esse anexo está divido em duas partes. Na primeira, destacam-se os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa de campo e na identificação/seleção das novas tecnologias para a IBKER para as diferentes fontes de energia estudadas. Na segunda, são apresentados os principais resultados obtidos com a pesquisa de campo a partir da metodologia adotada.

1. Procedimentos metodológicos da pesquisa de campo

A pesquisa de campo do estudo envolveu a realização de um conjunto de procedimentos, relacionados à preparação da pesquisa, à execução da coleta de dados e à análise dos resultados. Em relação à fase preparatória, um primeiro procedimento metodológico adotado consistiu na elaboração da lista de tecnologias emergentes a serem avaliadas, para a IBKER de cada uma das quatro fontes de energia estudadas (eólica, solar, biomassa e PCHs).

A elaboração das quatro listas de tecnologia seguiu as diretrizes estabelecidas na Oficina de Trabalho Inaugural, na qual se apresentou a metodologia da pesquisa ao comitê técnico e se estabeleceram os critérios para a identificação e a seleção das tecnologias emergentes para a IBKER. Foram os critérios estabelecidos: tecnologias relacionadas à produção na IBKER e tecnologias relacionadas especificamente aos bens de capital para energias renováveis, nos estágios de comercialização, pré-comercialização, desenvolvimento e pesquisa.

Com base nos critérios estabelecidos, o comitê técnico elaborou quatro listas de tecnologias (uma para cada fonte estudada). Essas listas foram apresentadas, discutidas e aperfeiçoadas na Oficina de Trabalho 2, na qual participaram a coordenação do projeto e membros do comitê técnico, entre outros, cabendo aos especialistas do comitê técnico incorporar as implementar as sugestões e reenviar as listas de tecnologias emergentes na IBKER finalizadas para a coordenação do projeto.

Com base nas listas de tecnologias finalizadas, a coordenação do projeto aplicou a regra de redação do estudo para adequação do texto que posteriormente viria a integrar o questionário. Foi a regra de redação aplicada a cada tecnologia listada:

> *Uso de... (tecnologia emergente)... em... (segmento, componente, princípio, etapa da produção etc.)... visando... (propriedade, desempenho, um aperfeiçoamento etc.)...*

Portanto, após a implementação da regra de redação, foram geradas quatro listas de tecnologias (uma para a fonte de energia eólica, uma para solar, uma para biomassa e uma para PCH), apresentadas neste anexo. Posteriormente, essas listas de tecnologias passaram a integrar o questionário da pesquisa de campo. Mais especificamente em relação ao questionário, verifica-se, conforme a **Tabela A.I**, que as linhas do mesmo são formadas pela lista de tecnologias obtidas através dos procedimentos anteriormente descritos. Em contrapartida, as colunas do questionário buscam captar as dimensões relevantes para a pesquisa. Neste sentido, a primeira coluna identifica o conhecimento do respondente sobre a tecnologia investigada. A segunda coluna investiga a factibilidade técnica da tecnologia investigada. A viabilidade do uso comercial no mundo até 2025, da nova tecnologia investigada, refere-se à indagação da terceira coluna. A quarta coluna indaga ao respondente a possibilidade de difusão da nova tecnologia, no Brasil, nos próximos cinco anos e nos próximos 15 anos. Por fim, atendendo a uma dimensão central do estudo,[49] a quinta coluna questiona o respondente sobre a possibilidade de produção da nova tecnologia no Brasil.

Ressalta-se ainda que este questionário foi aplicado por meio eletrônico, com o painel de respondentes, com base numa senha específica disponibilizada pela coordenação do projeto,[50] tendo acesso a uma área privilegiada do site do projeto, com questionários disponíveis. Em relação à formação do painel de respondentes, a metodologia adotada no projeto parte da elaboração de uma lista indicada pelo do comitê técnico do estudo e é formada por um amplo conjunto de especialistas, nas fontes de energia investigadas, atuando tanto na área pública quanto privada. Adicionalmente, a coordenação do estudo realizou um levantamento de empresas e representantes da indústria de bens de capital para energia, bem como de núcleos de pesquisa e acadêmicos,

49. Relacionada à identificação das possibilidades e capacitações para a produção de bens de capital para energias renováveis.

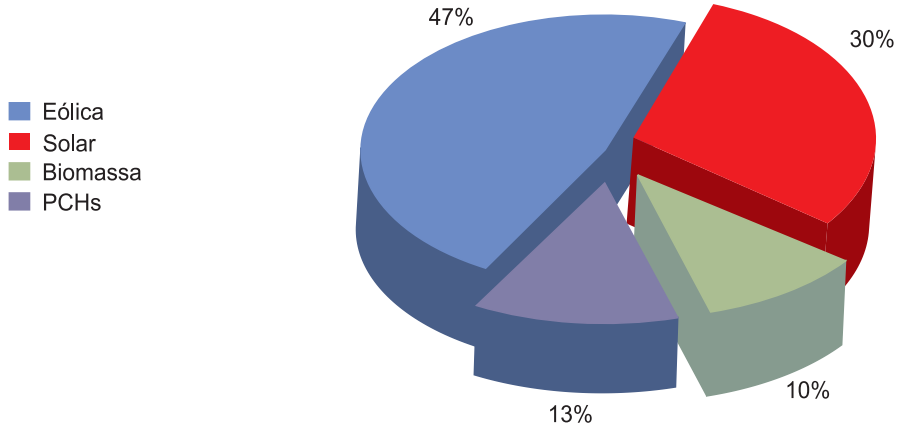
50. Ver www.ie.ufrj.br/gic/ibker.

com o intuito de ampliar ao máximo essa lista. Como resultado final, identificou-se um painel de especialistas para responder os questionários, formado por representantes de uma amostra representativa da indústria de bens de capital para energia, seus fornecedores, seus clientes e acadêmicos que desenvolvem pesquisas sobre o tema.

Este painel de respondentes especialistas foi convidado a participar da pesquisa de campo do projeto através do envio de uma carta-convite específica. Este procedimento permitiu a constituição de quatro painéis de respondentes, um para cada fonte de energia, que são os responsáveis por opinarem em relação às tecnologias investigadas para a IBKER nas diferentes fontes.[51] A composição do painel de respondentes do estudo é apresentada na **Figura AII.1**. Verifica-se que o painel é integrado por 388 especialistas, sendo que nas fontes de energia eólica e solar, há uma concentração maior de respondentes (47% e 30%, respectivamente). Com base nas respostas desse painel de especialistas, foram elaborados o banco de dados e as tabelas sínteses da pesquisa de campo.

51. Um mesmo especialista tinha a opção de opinar sobre mais de uma fonte de energia. Neste caso, esse especialista responderia mais de um questionário.

Figura AII.1
Composição e distribuição do painel de respondentes do estudo nas diversas fontes investigadas



Fonte de energia	Eólica	Solar	Biomassa	PCHs	Total
Nº de respondentes	184	116	39	49	388

Fonte: elaboração própria.

Posteriormente, um último procedimento refere-se ao processamento dos resultados obtidos na pesquisa de campo. Neste sentido, a **Figura AII.2** apresenta a metodologia que permitiu identificar as tecnologias relevantes para a IBKER nas diferentes fontes de energia.

Tabela A.I - Modelo de "cabeçalho" do questionário

Tecnologias emergentes	Conhecimento do respondente sobre o tópico	Factibili-dade	Viabilidade do uso comercial no mundo até 2025	Difusão esperada do tópico no Brasil		Potencial para produção no Brasil
Descrição: Tecnolo-gia: uso (campo de aplicação), características				Em cinco anos	Em 15 anos	
1...	Não conhece Conhece superficialmente Conhece evoluções recentes Monitora pesquisas Realiza pesquisas	Factível Não factível	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta
...	–		–	–	–	–
n...	Não conhece Conhece superficialmente Conhece evoluções recentes Monitora pesquisas Realiza pesquisas		Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta	Nula ou baixa Média Alta

Percebe-se, com base no fluxograma, que o primeiro filtro aplicado busca identificar a factibilidade da tecnologia emergente analisada, logo, assume-se o critério de que a tecnologia em questão é factível quando, no mínimo, 70% dos especialistas entrevistados a considerem assim, caso contrário, a tecnologia é considerada não factível e "descartada" da análise. Posteriormente, o requisito analisado relaciona-se com a viabilidade do uso comercial no mundo da tecnologia analisada, neste caso, a tecnologia é considerada viável caso 70% dos especialistas tenham esta opinião, em contrapartida, se a tecnologia analisada não atender esse requisito, ela será considerada não viável e descartada da análise. Por fim, uma última análise, no sentido de considerar a tecnologia relevante ou não, investiga a percepção dos especialistas respondentes sobre a velocidade de difusão esperada da nova tecnologia no Brasil. Neste caso, quando mais de 70% dos especialistas consideram que a tecnologia será difundida em média/alta escala nos próximos cinco anos e em alta escala nos próximos 15, a tecnologia é considerada relevante, caso contrário, a tecnologia é considerada não atrativa e descartada da análise.

Portanto, as tecnologias emergentes analisadas, que atendem aos critérios metodológicos assumidos na pesquisa de campo, são consideradas tecnologias relevantes, no sentido de que devem ter especial atenção da IBKER, apontando as tendências futuras em termos de produção e tecnologia do produto. Adicionalmente, adota-se um critério que busca medir a potencialidade de produção da tecnologia relevante identificada no Brasil até 2025. Neste sentido, se mais de 50% dos especialistas acreditam que a tecnologia tem alto potencial de produção no Brasil, ela é considerada uma "Tecnologia Relevante Prioritária", caso contrário, ela é considerada uma "Tecnologia Relevante Crítica".

Com base nos procedimentos metodológicos adotados na pesquisa de campo e no processamento dos resultados da mesma, podemos identificar para cada fonte de energia investigada um conjunto de tecnologias emergentes que podem ser classificadas em dois grupos distintos: tecnologias relevantes prioritárias e tecnologias relevantes críticas. As tecnologias relevantes são as consideradas, pelos especialistas respondentes, de alta factibilidade, alta viabilidade e alta/rápida difusão esperada no Brasil. Em contrapartida, essas tecnologias relevantes podem ter um elevado potencial de produção no Brasil até 2025, o que as tor-

nam "relevantes prioritárias", no sentido de que a IBKER deve direcionar seus esforços para a consolidação e o desenvolvimento de suas capacitações nelas. Em compensação, se na opinião do painel de respondentes as tecnologias relevantes investigadas possuem baixo potencial de produção no Brasil até 2025, elas são consideradas "relevantes críticas" demandando que tanto a IBKER quanto as agências de fomento e desenvolvimento busquem soluções que permitam o desenvolvimento e a produção dessas tecnologias no Brasil.

Cabe destacar que todos os resultados obtidos na pesquisa de campo foram submetidos à validação do painel de especialistas nas diferentes fontes de energia que participam da pesquisa. Neste sentido, o resultado que será apresentado na próxima seção refere-se exclusivamente aos obtidos na pesquisa de campo (objeto deste produto), sendo que a posterior análise e validação do painel de especialistas das tecnologias relevantes (prioritárias e críticas) identificadas no campo constam no produto final do estudo (relatório final).

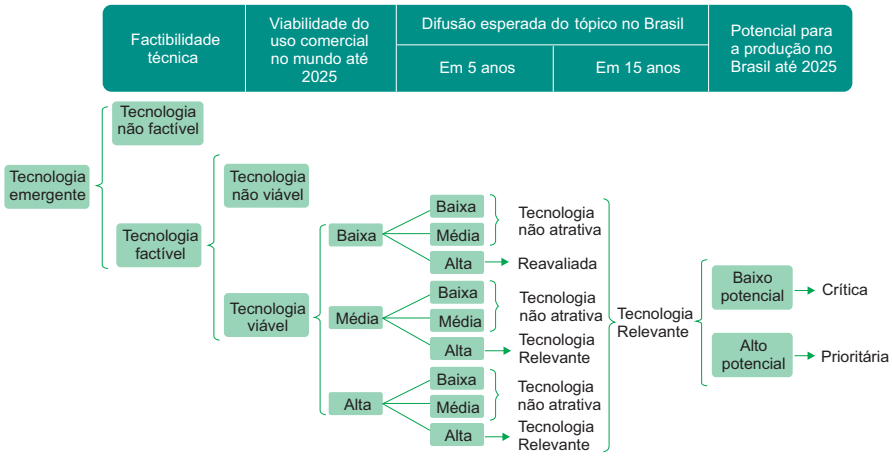


Figura AII.2
Processamento dos resultados da pesquisa de campo

2. Resultados da pesquisa de campo

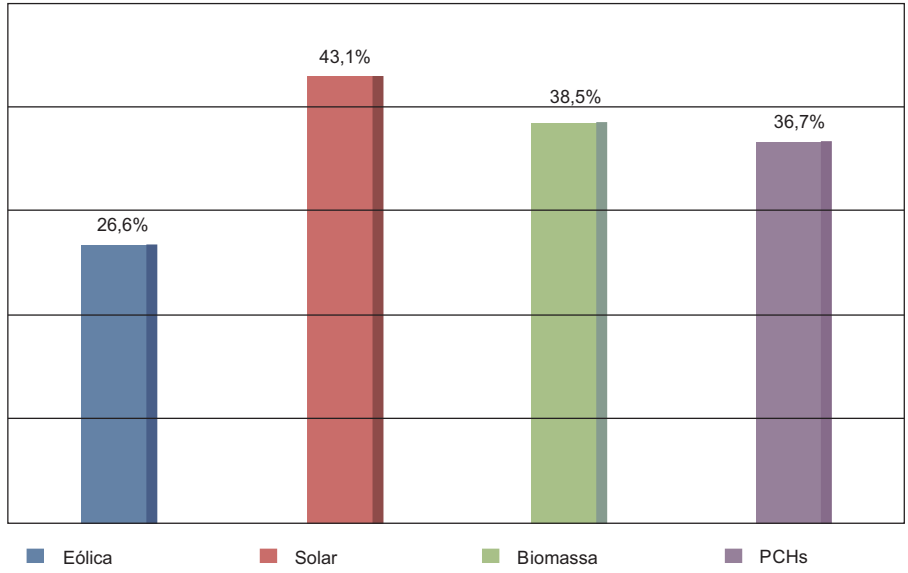
A análise proposta nesta pesquisa consiste em identificar as tecnologias emergentes para a IBKER em quatro fontes distintas, quais sejam: eólica, solar, biomassa e PCH. Neste sentido, os procedimentos metodológicos descritos na seção anterior foram aplicados de forma individual a dada uma das fontes de energia pesquisadas. Portanto, os resultados

da pesquisa de campo podem ser analisados de forma individual para cada uma dessas fontes. Esta seção apresenta os resultados alcançados durante a pesquisa de campo em termos das características dos respondentes e das tecnologias consideradas relevantes (prioritárias e críticas), para as quatro fontes de energia.

Inicialmente, cabe destacar a taxa de participação do painel de respondentes na pesquisa de campo (**Figura AII.3**). Conforme os dados obtidos, ressalta-se que o estudo alcançou uma taxa de resposta de 34%, ou seja, um total de 132 especialistas respondentes participou da pesquisa. De forma individual, nota-se que a energia solar alcançou o índice mais elevado de respostas (43%), seguido da biomassa (38%), PCH (36%) e eólica (26%).

Figura AII.3
Índice de respostas obtidas (total de respondentes/ respostas)

Fonte: elaboração própria.



Fonte de energia	Eólica	Solar	Biomassa	PCHs	Total
Nº de respostas obtidas na pesquisa de campo	49	50	15	18	132

Em contrapartida, em termos absolutos, nas fontes de energia eólica e solar ocorreu uma maior participação (aproximadamente 50 respondentes em cada fonte), muito em função da própria composição do painel de respondentes, com um peso maior nessas duas fontes. Como destacado na metodologia da pesquisa de campo, a composição

do painel de respondentes procurou ser homogênea, no sentido de contemplar especialistas ligados à academia e à indústria. Em contrapartida, com base nas respostas obtidas, segundo a área de atuação dos especialistas respondentes, percebe-se uma forte participação da indústria *vis-à-vis* integrantes da academia. Nas fontes de energia eólica e PCH, a taxa de participação de acadêmicos nas respostas foi inferior a 20% (16% no caso da eólica e 6% na PCH). Em compensação, nas respostas relacionadas à biomassa e à solar, a participação de especialistas do meio acadêmico foi mais significativa, ambas superiores a 40%.

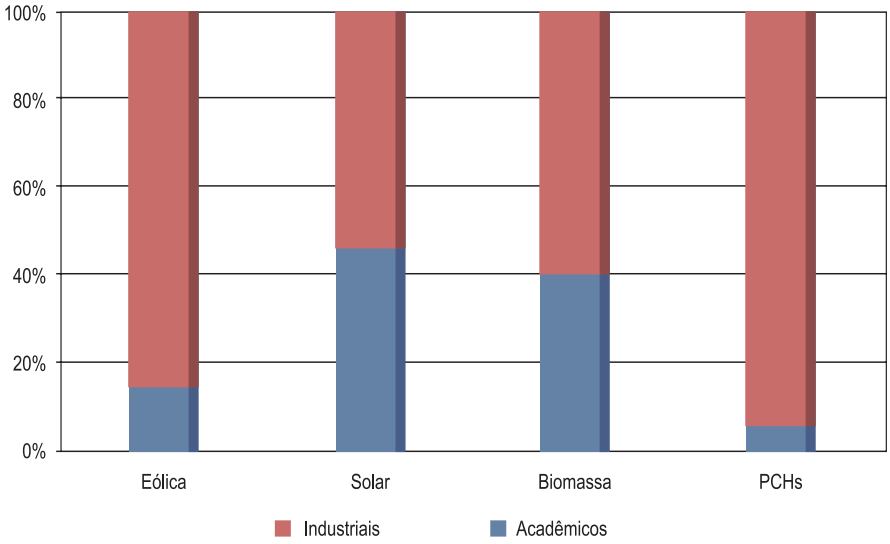


Figura AII.4
Participação de respondentes do "meio acadêmico" e do "meio industrial" nas respostas obtidas

Fonte: elaboração própria.

Portanto, podemos verificar que a pesquisa de campo alcançou uma taxa de respostas de aproximadamente 35%. As fontes de energia eólica e solar tiveram uma maior participação absoluta nas respostas. Em contrapartida, as fontes solar e de biomassa alcançaram um maior percentual de resposta em relação ao painel inicial. Por fim, cabe destacar que há uma maior concentração de respondentes da indústria, em detrimento da participação de acadêmicos. Apesar da composição inicial do painel de respondentes ser homogêneo entre acadêmicos e industriais, o índice de respostas foi significativamente mais elevado entre os representantes da indústria. Cabe agora analisar os resultados obtidos com a pesquisa de campo e o posterior processamento dos dados para cada fonte de energia.

A. Energia eólica

Como destacado, na pesquisa de campo relacionada à fonte de energia eólica, foi obtido um total de 49 respostas. De um total de 39 tecnologias emergentes investigadas (ver **Figura AII.5**), 7,7% foram consideradas não factíveis, 28% não viáveis e 5,1% não atrativas. Em contrapartida, 59% das tecnologias investigadas foram consideradas relevantes, sendo que destas, oito tecnologias foram classificadas como relevantes críticas e 15 como relevantes prioritárias.

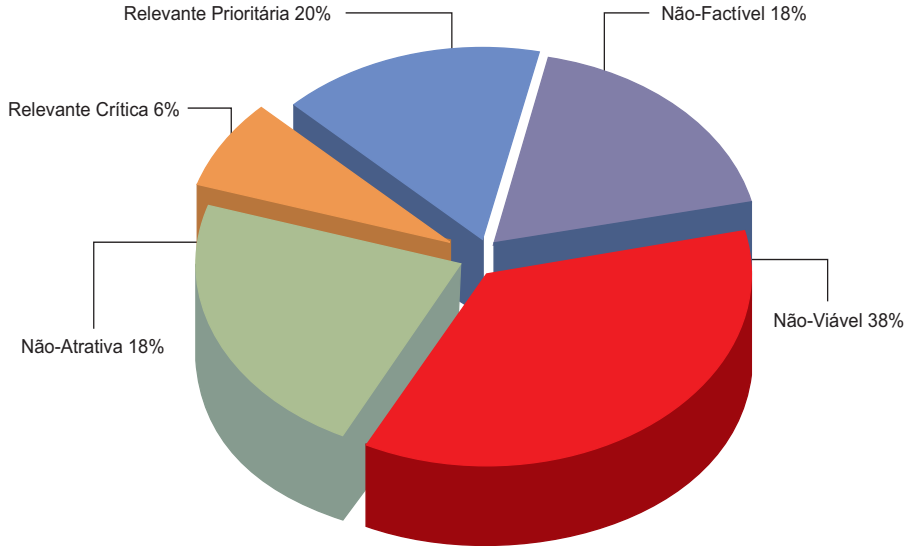


Figura AII.4
Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia eólica

Fonte: elaboração própria.

Fonte de energia	Não factível	Não viável	Não atrativa	Relevante crítica	Relevante prioritária	Total de tecnologias investigadas
Nº de tecnologias	3	11	2	8	15	39

A **Tabela AII.2** destaca as tecnologias relevantes identificadas na pesquisa de campo, levando em consideração o caráter crítico e prioritário da mesma – as demais tecnologias são apresentadas na **Tabela AII.3**. Em relação a esta fonte de energia, nota-se que a maioria das tecnologias relevantes está concentrada no estágio de transformação da fonte (o vento) em energia propriamente dita. Ainda em relação às tecnologias relevantes para a energia solar, constata-se a relevância da

captação e da ligação com a rede nessas tecnologias. Portanto, como resultado da pesquisa de campo para a energia eólica, verifica-se que foram identificadas 15 tecnologias relevantes e prioritárias e oito tecnologias relevantes e críticas. Essas tecnologias estão relacionadas às etapas de captação, ligação com a rede e principalmente, transformação.

Tabela AII.2 - Classificação das tecnologias analisadas para a fonte de tecnologia eólica em relevantes prioritárias e críticas, conforme os resultados da pesquisa de campo

Tecnologias relevantes	Tecnologia
Prioritárias	Uso de torre autoportante para aerogeradores acima de 10 kW, visando minimizar custos
	Uso de tintas especiais em equipamentos elétricos e mecânicos *offshore* (partes acima do nível da água e partes submersas) para a proteção atmosférica
	Uso de sistemas de controle inteligentes em grandes parques eólicos para a conexão com a rede elétrica
	Uso de navios especiais para transporte e instalação de aerogeradores previamente montados e comissionados
	Uso de modelos de pás mais adequados ao perfil de vento brasileiro, visando um melhor aproveitamento de velocidades mais baixas
	Uso de inversores inteligentes em sistemas híbridos solar-eólico-diesel para um gerenciamento mais inteligente das fontes de geração e controle de demanda
	Uso de ímã permanente em neodímio para maquinas elétricas de alto desempenho
	Uso de conversores de potência para a compensação de reativos em grandes parques eólicos
	Uso de conversores de potência na conexão com a rede para a redução de perdas e fornecimento de energia com alta qualidade
	Uso de controle ativo de posicionamento em aerogeradores de pequeno porte para aumentar a eficiência na captação do vento (aerogeradores sem rabeta/leme)
	Uso de analisadores de qualidade da energia integrados aos medidores de energia para um melhor monitoramento da geração e de seu desempenho na rede
	Uso de aerogeradores de 10 kW em sistemas isolados
	Uso de baterias níquel
	Uso de baterias chumbo
	Uso de baterias chumbo

Tabela AII.2 (continuação)	
Críticas	Uso de materiais de alto desempenho para caixas de redução
	Uso de materiais de alto desempenho em sistemas de freio de emergência
	Uso de lubrificantes especiais para caixas de redução
	Uso de fibra de carbono, visando a confecção de pás mais leves e resistentes
	Uso de controladores de carga inteligentes no controle de carga e descarga das baterias para uma maior eficiência e redução de perdas
	Uso de baterias níquel-zinco
	Uso de aerogeradores de 50 kW
	Uso de tintas especiais em equipamentos elétricos e mecânicos *offshore* (partes acima do nível da água e partes submersas) para a proteção atmosférica

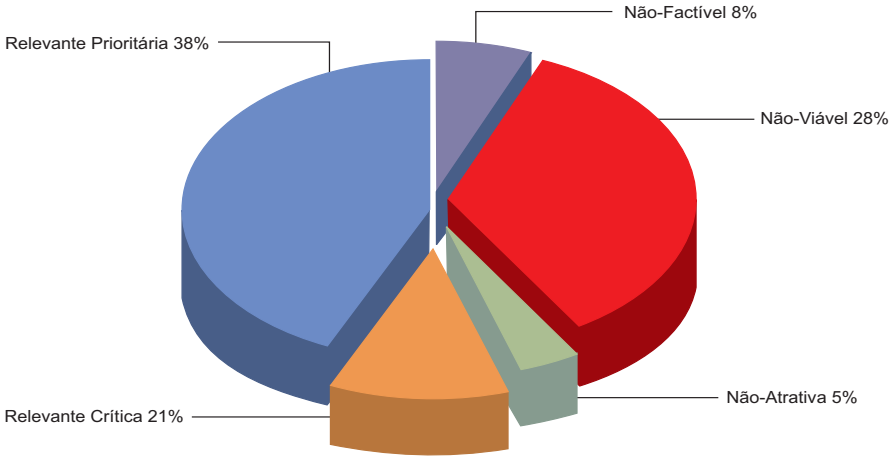
Fonte: Elaboração própria.

Tabelo AII.3 - Classificação das demais tecnologias ligadas à fonte de energia eólica

Classificação das tecnologias	Tecnologia
Não factível	Uso de fios de supercondutividade em geradores elétricos para a redução das perdas elétricas durante a geração
	Uso de baterias níquel-cádmio
	Uso da tecnologia LIDAR (Light Detection and Ranging) em aparelhos e equipamentos para a medição do vento para proporcionar maior acurácia na medição dos ventos em diversas alturas
Não viável	Uso de ligas especiais em parafusos de fixação de torres, nacelas e pás
	Uso de controle ativo de potência do tipo *pith* para aerogeradores de pequeno porte
	Uso de baterias chumbo-ácido com gel
	Uso de baterias chumbo-ácido AGM (absorbed glass mat)
	Uso de aerogeradores de 100 kW
	Uso de *tripodstructure* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 - 60 m)
	Uso de "plataformas flutuantes" em projetos de fundações de parques eólicos *offshore* para profundidades altas (60 - 900 m)
	Uso de *monopile* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 - 60 m)
	Uso de *jacket structure* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 - 60 m)
	Uso de *gravity base structure* em projetos de fundação de parques eólicos *offshore* para profundidades rasas e intermediárias (0 - 60 m)
	Uso de dispositivos Scanter para a correção dos efeitos do vento sobre os radares de controle aéreo e meteorológicos
Não atrativa	Uso de controle ativo de freios em pás de aerogeradores de pequeno porte
	Uso de aerogeradores de pequeno porte (até 5 kW) do tipo *savonius* para a geração de energia elétrica em edifícios e casas

B. Energia solar

Na pesquisa de campo relacionada à energia solar, foi obtido um total de 50 respostas na pesquisa de campo. Com base nessas respostas (**Figura AII.6**), podemos identificar que, das 50 tecnologias analisadas, 18% foram consideradas não fatíveis, 38% não viáveis e 18% não atrativas, conforme se pode observar nas **Tabelas AII.4** e **AII.5**. As tecnologias consideradas relevantes totalizam 26%, sendo que destas, 10 foram consideradas relevantes prioritárias e três relevantes críticas. Conforme a **Tabela AI.3**, as tecnologias relevantes para a fonte de energia solar estão concentradas em dois estágios distintos, quais sejam: captação e ligação com a rede. Portanto, como resultado da pesquisa de campo para a energia solar, nota-se que de um total de 50 tecnologias, 10 foram selecionadas como relevantes prioritárias e três como relevantes críticas, sendo que destas, há uma forte concentração de captação e ligação com a rede.



Fonte de energia	Não factível	Não viável	Não atrativa	Relevante crítica	Relevante prioritária	Total de tecnologias investigadas
Nº de tecnologias	9	19	9	3	10	50

Fonte: Elaboração própria.

Figura AII.6
Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia solar

Fonte: elaboração própria.

Tabela AII.4 - Classificação das tecnologias analisadas para a fonte de energia solar em relevantes prioritárias e críticas, conforme os resultados da pesquisa de campo

Tecnologias relevantes	Tecnologia
Prioritárias	Uso de rota metalúrgica para a purificação do silício para a produção de células solares
	Uso do método Czochralski para a produção de lingotes de silício
	Uso do silício cristalino (monocristalino e multicristalino) para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso de eixo horizontal com orientação norte-sul em sistemas de seguimento com rotação
	Uso de inversores autocomutados e chaveados por transistores IGBT para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores autocomutados sem transformador para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores autocomutados com saída em baixa tensão (100 V_{CA} a 400 V_{CA}) para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores baseados em modulação senoidal por largura de pulso (PWM) para sistemas isolados
	Uso de baterias chumbo-ácido com gel
	Uso de baterias chumbo-ácido com eletrólito líquido
Críticas	Uso de inversores autocomutados e chaveados por MOSFET para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores autocomutados com transformador de baixa frequência para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de controladores de carga com seguidor do ponto de máxima potência (MPPT) para baterias

Fonte: Elaboração própria.

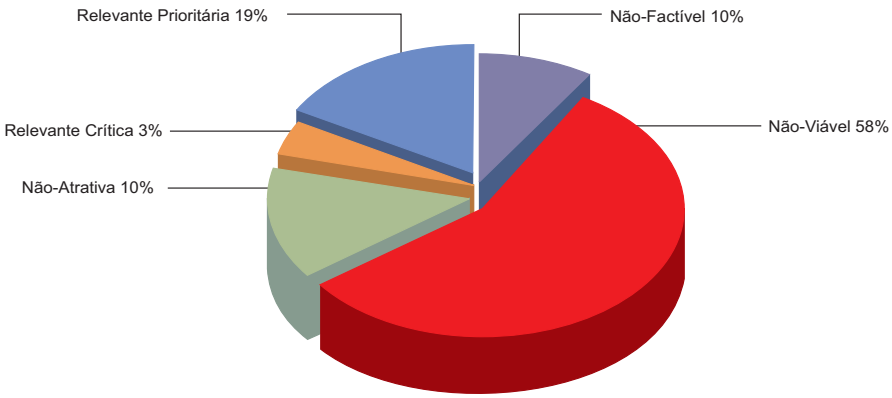
Tabela AII.5 - Classificação das demais tecnologias ligadas à fonte de energia solar

Classificação das tecnologias	Tecnologia
Não factível	Uso do arsenieto de gálio para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso de inversores autocomutados e chaveados por tiristores GTO para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores autocomutados e chaveados por transistores bipolares BT para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica e chaveados por tiristores para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica e chaveados por transistores IGBT para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores autocomutados com transformador de alta frequência para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica com transformador de baixa frequência para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de controladores de carga do tipo contínuo (liga-desliga) para baterias
	Uso de controladores de carga com compensação de temperatura para baterias
Não viável	Uso de plasma térmico para a redução do quartzo de alta pureza para a produção de lâminas de silício para a produção de células solares
	Uso de solidificação direcional com lingotamento contínuo para a obtenção de bloco multicristalino para a produção de lingotes de silício
	Uso do método da fusão zonal flutuante para obtenção de bloco multicristalino para produção de lingotes de silício
	Uso dos compostos dos grupos I-III-VI (disselenato de cobre índio (CIS – CuInSe2), disselenato de cobre gálio índio [CIGS – Cu(InGa)Se2] e outros) para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso de módulos fotovoltaicos com espelhos com concentração
	Uso de módulos fotovoltaicos com lentes com concentração
	Uso de eixo polar com orientação norte-sul inclinado em sistemas de seguimento com rotação
	Uso de eixo vertical com orientação azimutal em sistemas de seguimento com rotação
	Uso de inversores autocomutados com saída em média tensão (1 kV_{CA} a 35 kV_{CA}) para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica com saída em baixa tensão (100 V_{CA} a 400 V_{CA}) para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de inversores comutados pela rede elétrica com saída em média tensão (1kV_{CA} a 35 kV_{CA}) para a ligação com a rede elétrica (CR)
	Uso de baterias chumbo-ácido AGM (absorbed glass mat)
	Uso de baterias níquel-cádmio
	Uso de baterias níquel-zinco
	Uso de concentradores cilindro-parabólicos (*trough*) em sistema heliotérmico
	Uso de concentradores com refletores lineares fresnel em sistema heliotérmico
	Uso de concentrador com receptor central (torre) em sistema heliotérmico
	Uso de concentrador com discos parabólicos (*dish*) em sistema heliotérmico
	Uso de tecnologias de sais fundentes para o armazenamento de energia térmica com calor latente em sistema heliotérmico

Tabela AII.5 (continuação)	
Não atrativa	Uso de rota química para a purificação do silício para a produção de células solares
	Uso de solidificação direcional HEM (Heat Exchange Method) para a obtenção de bloco multicristalino para a produção de lingotes de silício
	Uso do silício amorfo e microcristalino para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso do telureto de cádmio para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso de materiais orgânicos para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos
	Uso de módulos fotovoltaicos estáticos com concentração
	Uso de eixo horizontal com orientação leste-oeste em sistemas de seguimento com rotação
	Uso de dois eixos controlados independentemente (vertical e horizontal) com orientação normal à radiação solar em sistemas de seguimento com rotação
	Uso de controladores de carga do tipo pulsado (PWM) para baterias

C. Energia biomassa

No caso da fonte de energia ligada à biomassa, obteve-se um total de 15 respostas aos questionários. Verifica-se, com base nas respostas (**Figura AI.7**), que do total de 31 tecnologias analisadas, 9,7% foram consideradas não factíveis, 58% não viáveis e 9% não atrativas. Aproximadamente 30% das tecnologias foram consideradas relevantes, sendo que, destas, seis foram classificadas como relevantes prioritárias e apenas uma como relevante crítica. Em relação às tecnologias entendidas como relevantes (**Tabela AII.6**), nota-se que todas estão relacionadas ao estágio de transformação da fonte de energia em energia propriamente dita. A **Tabela AII.7** lista as demais tecnologias avaliadas.



Fonte de energia	Não factível	Não viável	Não atrativa	Relevante crítica	Relevante prioritária	Total de tecnologias investigadas
Nº de tecnologias	3	18	3	1	6	31

Fonte: Elaboração própria.

Figura AII.7
Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia de biomassa

Fonte: elaboração própria.

Tabela AII.6 - Classificação das tecnologias analisadas para a fonte de energia de biomassa em relevantes prioritárias e críticas, conforme os resultados da pesquisa de campo

Tecnologias relevantes	Tecnologia
Prioritárias	Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da hidrólise enzimática de biomassa
	Uso em célula a combustível de etanol direto de bioetanol obtido a partir da hidrólise enzimática de biomassa
	Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da fermentação/destilação de cana-de-açúcar
	Uso em motor de combustão interna de biodiesel obtido a partir da transesterificação de óleos vegetais
	Uso em um sistema "purificador - motor de combustão interna" de gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa
Críticas	Uso em motor de combustão interna de biogás obtido a partir da digestão anaeróbica da biomassa

Fonte: Elaboração própria.

Tabela AII.7 - Classificação das demais tecnologias ligadas à fonte de energia de biomassa

Classificação das tecnologias	Tecnologia
Não factível	Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da hidrólise ácida da biomassa
	Uso em motor de combustão interna de bioetanol obtido a partir da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
	Uso em célula a combustível de etanol direto de bioetanol obtido a partir da conversão de gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
Não viável	Uso em célula a combustível de etanol direto de bioetanol obtido a partir da hidrólise ácida da biomassa
	Uso em motor de combustão interna de biodiesel obtido a partir da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
	Uso em motor de combustão interna de biodiesel obtido a partir da pirólise da biomassa
	Uso em motor de combustão interna de diesel obtido a partir do gás de síntese
	Uso em motor de combustão interna de gasolina obtida a partir do gás de síntese
	Uso em uma célula a combustível de óxido sólido de biogás obtido a partir da digestão anaeróbica da biomassa
	Uso em um sistema "reformador - célula a combustível de membrana polimérica" de biogás obtido por meio da digestão anaeróbica da biomassa
	Uso em uma turbina a gás do gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa
	Uso em um sistema "purificador - célula a combustível de membrana polimérica" de gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa
	Uso em um sistema "purificador - reformador - célula a combustível de óxido sólido" de gás de síntese obtido por meio da gaseificação da biomassa
	Uso em uma "célula combustível - membrana polimérica" de hidrogênio obtido através da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
	Uso em uma "célula combustível - óxido sólido" de hidrogênio obtido através da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
	Uso em uma "célula a combustível de metanol direto" de metanol obtido através da conversão do gás de síntese proveniente da gaseificação da biomassa
	Uso em um ciclo *stirling* de calor obtido por meio da combustão da biomassa
	Uso em turbinas de queima externa (EFGT) de calor obtido por meio da combustão da biomassa
	Uso em motor a vapor (de pistão) do vapor obtido por meio da combustão da biomassa
	Uso em motor a vapor (de rosca) do vapor obtido por meio da combustão da biomassa
	Uso em microturbina a vapor do vapor obtido por meio da combustão da biomassa

Tabela AII.7 (continuação)	
Não atrativa	Uso em Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) de vapor obtido por meio da combustão da biomassa e do gás natural
	Uso em Ciclo Rankine de vapor obtido por meio da cocombustão da biomassa e do carvão
	Uso em Ciclos a Vapor Rankine de vapor obtido por meio da cocombustão da biomassa e do gás natural

D. Energia PCH

Em relação às PCHs, das 59 tecnologias analisadas, com base num total de 18 respostas aos questionários, percebe-se que 15% das tecnologias foram consideradas não factíveis, 47% não viáveis e 5% não atrativas (ver **Figura AII.8** e **Tabela AII.9**). Em contrapartida, 31% das tecnologias analisadas foram consideradas relevantes, sendo que destas, 18 foram classificadas como relevantes prioritárias e uma como relevante crítica (**Tabela AII.8**). As tecnologias relevantes em PCH estão concentradas na etapa de ligação com a rede e principalmente, na transformação da fonte em questão em energia.

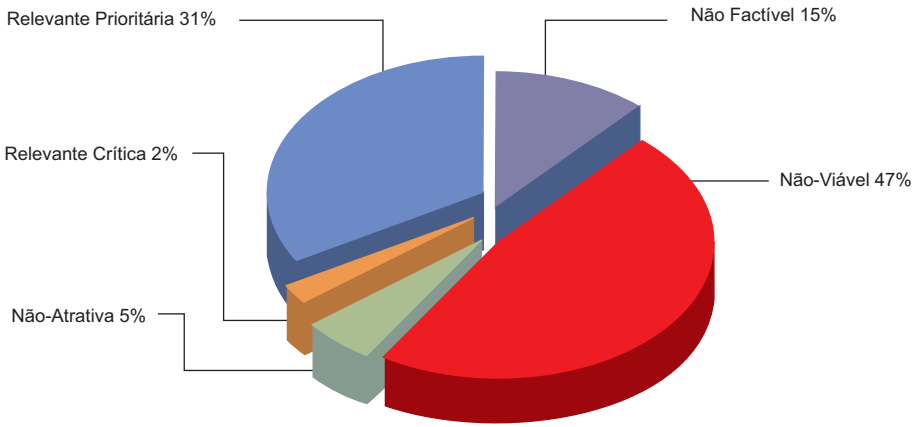


Figura AII.8
Classificação das tecnologias analisadas na fonte de energia PCH

Fonte: elaboração própria.

Fonte de energia	Não factível	Não viável	Não atrativa	Relevante crítica	Relevante prioritária	Total de tecnologias investigadas
Nº de tecnologias	9	28	3	1	18	59

Tabela AII.8 - Classificação das tecnologias analisadas para a fonte de energia PCH em relevantes prioritárias e críticas, conforme os resultados da pesquisa de campo

Tecnologias relevantes	Tecnologia
Prioritárias	Uso de turbina Francis, para centrais de médias rotações específicas (Francis normal)
	Uso de turbina Francis, para centrais de altas rotações específicas (Francis rápida)
	Uso de turbina axial tipo Kaplan (pás móveis) de altas rotações específicas (5 a 6 pás), com pás do rotor móveis e pás do distribuidor fixas
	Uso de turbinas Kaplan do tipo "S" com gerador externo a montante
	Uso de turbinas Kaplan do tipo "S" com gerador externo a jusante
	Uso de turbina com caixa espiral de aço
	Uso de gerador convencional de rotação constante síncrono, com rotações superiores a 600 rpm
	Uso de gerador convencional de rotação constante do tipo hidrogerador (gerador síncrono, com baixas rotações)
	Uso de excitatriz rotativa
	Uso de regulador de tensão
	Uso de sistema digital com regulador de velocidade
	Uso de sistema digital integrado (velocidade e de tensão) com regulador de velocidade
	Uso de operação desassistida no sistema de supervisão da central
	Uso de operação desassistida remota no sistema de supervisão da central
	Uso de tecnologia CLP no sistema de supervisão da central
	Uso de tecnologia totalmente digital no sistema de supervisão da central
Críticas	Uso de turbina com caixa espiral de concreto

Fonte: Elaboração própria.

Tabela AII.9 - Classificação das demais tecnologias ligadas à fonte de energia PCH

Classificação das tecnologias	Tecnologia
Não factível	Uso de turbinas Kaplan do tipo "S" com gerador externo vertical
	Uso de turbinas Kaplan do tipo tubular com gerador externo vertical
	Uso de conjunto hidrogerador do tipo "straflo" (fluxo direto) com rotor do gerador solidário ao da turbina
	Uso de turbina não convencional de fluxo cruzado ou Michell-Banki
	Uso de turbina não convencional de bomba funcionando como turbina
	Uso de turbina não convencional Turgo
	Uso de sistema mecânico (óleo-hidráulico) com regulador de velocidade
	Uso de sistema analógico com regulador de velocidade
	Uso de isolamento a seco em transformadores
Não viável	Uso de turbina Francis para centrais de baixas rotações específicas (Francis lenta)
	Uso de turbina Francis para centrais de altas rotações específicas (Francis dupla)
	Uso de turbina Axial (pás fixas) de altas rotações específicas (5 a 6 pás)
	Uso de turbina Axial (pás fixas) de muito altas rotações específicas (4 pás)
	Uso de turbina Axial (pás fixas) de altíssimas rotações específicas (3 pás)
	Uso de turbina axial do tipo Kaplan (pás móveis) de altas rotações específicas (5 a 6 pás) com pás do rotor fixas e pás do distribuidor móveis
	Uso de turbinas Kaplan do tipo tubular com gerador externo a montante
	Uso de turbinas Kaplan do tipo tubular com gerador externo a jusante
	Uso de turbinas bulbo com gerador interno
	Uso de turbinas bulbo com gerador externo
	Uso de turbinas bulbo com gerador interno do tipo PIT (poço)
	Uso de turbina não convencional Francis do tipo turbilhão
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor axial
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor axial e tubo de sucção
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor Darrieus
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor helicoidal ou Gorlov
	Uso de grupo hidrogerador hidrocinético com rotor do tipo parafuso de Arquimedes
	Uso de gerador convencional de rotação constante síncrono inferior a 1 MW, de eixo vertical com rotações inferiores a 600 rpm
	Uso de gerador convencional de rotação constante assíncrono
	Uso de gerador convencional de rotação constante síncrono de ímã permanente
	Uso de gerador não convencional de rotação variável
	Uso de excitatriz estática
	Uso de operação assistida no sistema de supervisão da central
	Uso de chaveamento manual
	Uso de colunas oscilantes na geração de energia de ondas do mar
	Uso de flutuadores em geração de energia de ondas do mar
	Uso de geradores de energia cinética em geração de energia de ondas do mar
	Uso de geradores de energia potencial em geração de energia de ondas do mar
Não atrativa	Uso de turbinas hidráulicas do tipo Pelton para centrais de baixas rotações específicas (altas quedas e pequenas vazões) com 1 e 2 jatos
	Uso de turbinas hidráulicas do tipo Pelton para centrais de médias rotações específicas (altas quedas e médias vazões) com 3, 4 ou 6 jatos
	Uso de turbina axial do tipo Kaplan (pás móveis) de altas rotações específicas (5 a 6 pás) com pás do rotor móveis e pás do distribuidor móveis

Anexo III
Tabelas de síntese da pesquisa de campo

Introdução

A metodologia do projeto PDTS-IBKER incluiu uma pesquisa de campo, na qual especialistas nas diferentes fontes de energia investigadas foram consultados a respeito de seus conhecimentos e percepções em relação às listas de tecnologias elaboradas pelo comitê técnico da pesquisa.[52] A consulta envolveu a aplicação de um questionário via Internet, disponível em http://www.ie.ufrj.br/gic/ibker.

52.As listas de tecnologias que serviram de base para a elaboração do questionário foram descritas no Anexo I deste relatório.

O questionário propõe seis questões fechadas para cada tecnologia identificada, conforme descrito na **Tabela AIII.1** a seguir.

Tabela AIII.1 - Questões e possibilidades de respostas

Questões	Possibilidades de respostas
Conhecimento do respondente sobre o tópico/tecnologia	Não conhece Conhece superficialmente Conhece evoluções recentes Monitora pesquisas realizadas Realiza pesquisa
Factibilidade técnica	Factível Não factível
Viabilidade do uso comercial no mundo até 2025	Nula ou baixa Média Alta
Difusão esperada da tecnologia no Brasil em cinco anos	Nula ou baixa Média Alta
Difusão esperada da tecnologia no Brasil em 15 anos	Nula ou baixa Média Alta
Potencial para a produção no Brasil até 2025	Nula ou baixa Média Alta

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados da consulta aos especialistas foram organizados em um banco de dados. Esta nota metodológica tem por objetivo detalhar as características do banco de dados e descrever algumas características estruturais das tabulações geradas para cada uma das fontes de energia pesquisada.

1. Banco de dados gerado no estudo

A aplicação dos questionários da pesquisa de campo do projeto proporcionou a elaboração de um banco de dados com o intuito de facilitar o acesso às informações agregadas obtidas na pesquisa. Neste sentido, optou-se por agregar as mesmas num programa de fácil utilização e acesso, no caso, o Excel. Dessa forma, é parte integrante deste Produto 9 um arquivo em Excel formado por uma planilha, "Banco de Dados (saída2)", composta de dez colunas e 8.779 linhas descritas a seguir.

As colunas do banco de dados compreendem as seguintes informações:

- Coluna 1 - ID respondente: número de identificação do especialista respondente da pesquisa de campo.
- Coluna 2 - Nome do respondente: nome do especialista respondente da pesquisa de campo.
- Coluna 3 - ID fonte de energia: número de identificação da fonte de energia pesquisada, sendo: 1= solar, 2 = eólica, 3= biomassa e 6 = PCH.
- Coluna 4 - Fonte de energia: nome da fonte de energia pesquisada (solar, eólica, biomassa e PCH).
- Coluna 5 - ID nova tecnologia: número de identificação da tecnologia emergente.
- Coluna 6 - Descrição nova tecnologia: descrição da tecnologia investigada, identificando a tecnologia, seu uso (campo de aplicação) e suas características.[53]
- Coluna 7 - ID cabeçalho: número de identificação das questões que formam o cabeçalho do questionário, compreendendo as questões 1 a 6 descritas na coluna seguinte (ver **Tabela AIII.2**).
- Coluna 8 - Descrição do cabeçalho: descrição das questões da pesquisa, sendo 1 - Conhecimento do respondente sobre o tópico; 2 - Factibilidade técnica; 3 - Viabilidade do uso comercial no

53. Conforme apresentado no questionário da pesquisa de campo detalhado no Produto 5 e disponível em http://www.ie.ufrj.br/gic/ibker.

mundo até 2025; 4 - Difusão esperada da tecnologia no Brasil em cinco anos; 5 - Difusão esperada da tecnologia no Brasil em 15 anos; e 6 - Potencial para produção no Brasil até 2025 (ver **Tabela AIII.2**).

- Coluna 9 – ID resposta: número de identificação da resposta dada pelo especialista respondente a determinada questão relacionada à tecnologia investigada, de 1 a 21 (ver **Tabela AIII.2**).
- Coluna 10 – Descrição da resposta: resposta dada pelo especialista respondente a determinada questão relacionada à tecnologia investigada (ver **Tabela AIII.2**).

A **Tabela AIII.2** descreve as questões (itens do cabeçalho do questionário), com seus respectivos IDs, e as possibilidades de respostas (também com seus respectivos IDs) disponíveis para o especialista marcar.

Tabela AIII.2 - Questões e possibilidades de respostas (com IDs) e forma de apresentação no banco de dados

Coluna: ID cabeçalho	Coluna: descrição/item do cabeçalho	Coluna: ID resposta	Coluna: descrição da resposta
1	Conhecimento do respondente sobre o tópico/tecnologia	1	Não conhece
		2	Conhece superficialmente
		3	Conhece evoluções recentes
		4	Monitora pesquisas realizadas
		21	Realiza pesquisa
2	Factibilidade técnica	7	Factível
		20	Não factível
3	Viabilidade do uso comercial no mundo até 2025	8	Nula ou baixa
		9	Média
		10	Alta
4	Difusão esperada da tecnologia no Brasil em cinco anos	11	Nula ou baixa
		12	Média
		13	Alta
5	Difusão esperada da tecnologia no Brasil em 15 anos	14	Nula ou baixa
		15	Média
		16	Alta
6	Potencial para produção no Brasil até 2025	17	Nula ou baixa
		18	Média
		19	Alta

Fonte: Elaboração própria.

As linhas do banco de dados correspondem às respostas dos especialistas para as seis questões propostas sobre cada uma das tecnologias investigadas. Logo, cada conjunto de seis linhas (seis questões) refere-se às seis respostas de um único respondente sobre uma única tecnologia investigada. No entanto, há uma exceção a esta regra: na pergunta 2, Factibilidade técnica, quando o respondente declara que a tecnologia investigada é não factível, as quatro questões subsequentes do questionário (Viabilidade do uso comercial no mundo até 2025, Difusão esperada da tecnologia no Brasil em cinco anos, Difusão esperada da tecnologia no Brasil em 15 anos e Potencial para produção no Brasil até 2025) não são respondidas. Neste caso, ao invés de seis, haverá apenas duas linhas/respostas do respondente sobre a tecnologia investigada (referentes a Conhecimento do respondente sobre o tópico e factibilidade técnica). Devem-se, portanto, fazer estas ressalvadas na análise do banco de dados.

2. Tabelas de síntese dos resultados da pesquisa de campo

O banco de dados proporcionou a elaboração de um conjunto de tabelas que sintetizam os resultados obtidos e facilitam as análises. Foram elaboradas quatro tabelas de síntese (em anexo, nos formatos *pdf e *xlsx), uma para cada fonte de energia pesquisada, contendo dados absolutos e percentuais relativos às seis questões propostas para cada tecnologia identificada. Cada tabela tem o nome "Estatísticas [fonte de energia]" e todas apresentam a mesma estrutura, descrita a seguir.

Cada linha da tabela equivale a uma tecnologia pesquisada e compreende os resultados relativos às categorias e às questões descritas nas colunas.

As colunas 1 e 2, referentes à questão **1 - Conhecimento do respondente sobre a tecnologia**, identificam o número de respondentes que opinaram sobre a tecnologia e quantos foram considerados especialistas. Destaca-se que foram considerados especialistas numa determinada tecnologia todos aqueles que responderam que monitoram as pesquisas realizadas ou que realizam pesquisas, uma distinção considerada relevante na análise das respostas das questões 4 a 6.

As colunas 3 e 4 compreendem as respostas relativas à questão **2 – Factibilidade** técnica e apresentam, respectivamente, a porcentagem de

respondentes totais e respondentes especialistas que consideram a tecnologia factível.

As colunas 5, 6 e 7 compreendem as respostas relativas à questão **3 - Viabilidade do uso comercial no mundo até 2025**. Seguindo a metodologia proposta no estudo, apenas a opinião dos respondentes considerados especialistas é levada em consideração. Logo, as colunas 5, 6 e 7 apresentam a porcentagem de especialistas que possuem, respectivamente, expectativa "nula ou baixa", "média" e "alta" na utilização da tecnologia investigada no mundo até 2025.

As respostas às questões **4 - Difusão esperada da tecnologia no Brasil nos próximos cinco anos** e **5 - Difusão esperada da tecnologia no Brasil nos próximos 15 anos** são apresentadas nas colunas 8 a 10 e 11 a 13, respectivamente. Note que foram consideradas apenas as expectativas dos respondentes especialistas (também em porcentagem). De forma similar ao conjunto de colunas anterior, para cada período (5 ou 15 anos), destaca-se a porcentagem de respondentes especialistas com expectativas "baixa ou nula", "média" ou "alta" difusão no Brasil.

Por fim, as colunas 14 a 16 destacam a opinião dos respondentes especialistas (em porcentagem) em relação à questão **6 - Potencial de produção no Brasil** das tecnologias investigadas, assumindo também os intervalos "nulo ou baixo" potencial, "médio" potencial e "alto" potencial.

Anexo IV
Empresas da IBKER segundo áreas e máquinas específicas, 2011

Tabela AIV.1 - Empresas da IBKER segundo áreas e máquinas específicas, 2011

Grande área	Máquinas específicas	Empresa
Pequenas centrais hidrelétricas	Central hidrelétrica	BETTA HIDROTURBINAS INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
		KOBLITZ S/A.
		RIBASA-RISCHBIETER INDÚSTRIA DE BASE S/A.
	Hidrogerador horizontal	ANDRITZ HYDRO INEPAR DO BRASIL S/A.
		DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
		WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A. - MOTORES
	Hidrogerador vertical	DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
	Gerador síncrono	WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A. - MOTORES
		BAMBOZZI ALTERNADORES LTDA.
		GEVISA S/A.
		WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A. - MOTORES
	Turbina hidráulica do tipo bomba de eixo vertical	VOITH HYDRO LTDA.
	Turbina hidráulica do tipo bulbo de eixo horizontal	ANDRITZ HYDRO INEPAR DO BRASIL S/A.
		BARDELLA S/A. INDÚSTRIAS MECÂNICAS
		DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
		HIDRÁULICA INDUSTRIAL S/A. INDÚSTRIA E COMÉRCIO
		VOITH HYDRO LTDA.
	Turbina hidráulica do tipo Francis de eixo horizontal	ANDRITZ HYDRO INEPAR DO BRASIL S/A.
		BARDELLA S/A. INDÚSTRIAS MECÂNICAS
		HACKER INDUSTRIAL LTDA.
		HIDRÁULICA INDUSTRIAL S/A. INDÚSTRIA E COMÉRCIO
		RIBASA-RISCHBIETER INDÚSTRIA DE BASE S/A.
		VOITH HYDRO LTDA.
	Turbina hidráulica do tipo Francis de eixo vertical	DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
		HIDRÁULICA INDUSTRIAL S/A. INDÚSTRIA E COMÉRCIO
		RIBASA-RISCHBIETER INDÚSTRIA DE BASE S/A.
		VOITH HYDRO LTDA.
	Turbina hidráulica do tipo Kaplan de eixo horizontal	BARDELLA S/A. INDÚSTRIAS MECÂNICAS
		DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
		HACKER INDUSTRIAL LTDA.
		HIDRÁULICA INDUSTRIAL S/A. INDÚSTRIA E COMÉRCIO
		RIBASA-RISCHBIETER INDÚSTRIA DE BASE S/A.
		VOITH HYDRO LTDA.

Tabela AIV.1 (continuação)		
Pequenas centrais hidrelétricas (continuação)	Turbina hidráulica do tipo Kaplan de eixo vertical	ANDRITZ HYDRO INEPAR DO BRASIL S/A.
		DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
		HIDRÁULICA INDUSTRIAL S/A. INDÚSTRIA E COMÉRCIO
		RIBASA-RISCHBIETER INDÚSTRIA DE BASE S/A.
		VOITH HYDRO LTDA.
	Turbina hidráulica do tipo Pelton de eixo horizontal	BETTA HIDROTURBINAS INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
		DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
		HACKER INDUSTRIAL LTDA.
		HIDRÁULICA INDUSTRIAL S/A. INDÚSTRIA E COMÉRCIO
		VOITH HYDRO LTDA.
	Turbina hidráulica do tipo Pelton de eixo vertical	DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
		HIDRÁULICA INDUSTRIAL S/A. INDÚSTRIA E COMÉRCIO
		VOITH HYDRO LTDA.
	Diversos equipamentos	ALSTOM POWER GENERATION
		ALTERIMA IND. COM. GERADORES LTDA.
		BETTA HIDROTURBINAS IND. E COM. LTDA.
		DEMUTH ENERGY
		GR GONÇALVES E RODRIGUES LTDA. MÁQUINAS HIDRÁULICAS ELÉTRICAS
		HACKER INDUSTRIAL LTDA.
		HIDROENERGIA
		HISA - HIDRÁULICA INDUSTRIAL S.A. IND. E COM.
		IND. E COM. DE MÁQUINAS FRANMAQ
		MCA ENGENHARIA IND. E COM. LTDA.
		MECAMIDI WIRZ IND. E COM. DE EQUIP. LTDA.
		NH GERADORES LTDA.
		RM EQUIPAMENTOS LTDA.
		SEMI INDUSTRIAL LTDA.
		TURBINAS HIDRÁULICAS EWB
		TURBINAS HIDRÁULICAS WIRZ - BEE IND. E COM. DE EQUIPAMENTOS LTDA..
		VOITH SIEMENS HYDRO POWER GENERATION LTDA.
		GEVISA S/A.
		FLESSAK ELETRO INDUSTRIAL
		GRUPO BAMBOZZI
		WEG MÁQUINAS
		TOSHIBA DO BRASIL S/A.
		VORTEX HYDRA DO BRASIL SISTEMAS INDUSTRIAIS LTDA.
		VORTEX HYDRA DO BRASIL SISTEMAS INDUSTRIAIS LTDA.
		RTS INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE VÁLVULAS LTDA.

Tabela AIV.1 (continuação)		
Eólica	Aerogerador	ELETROVENTO S/A.
		WIND POWER ENERGIA S/A. (IMPSA)
		WOBBEN WINDPOWER INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
	Catavento	CATAVENTOS FÊNIX INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
	Pá para aerogerador	TECSIS TECNOLOGIA E SISTEMAS AVANÇADOS LTDA.
	Torre para aerogerador	CONFAB INDUSTRIAL S/A.
		DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
		NGEBASA MECÂNICA E USINAGEM LTDA.
		GESTAMP WIND STEEL PERNAMBUCO S/A.
		SCS – SOLUÇÕES CONSTRUÇÕES E SISTEMAS LTDA.
Solar	Coletor de energia solar	A ATUAL IND.E COM.DE AQUECEDORES SOLARES LTDA. EPP
		AQUECEDORES CUMULUS S/A.INDÚSTRIA E COMÉRCIO
		CLIMATIC DO BRASIL AQUECEDORES LTDA. ME
		COLSOL COLETORES SOLARES LTDA.
		ENSOL ENERGIA SOLAR LTDA. ME
		INTECSOL - INDÚSTRIA DE TECNOLOGIA SOLAR LTDA.
		PANTHO INDUSTRIAL LTDA.
		SOLAR MINAS LTDA.
		SOLETROL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
	Painel solar fotovoltaico	SOLARIS TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA IND. COM. SERV. LTDA.
		SOLETROL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
		TECNOMETAL ENGENHARIA E CONSTRUÇÕES MECÂNICAS
Bio/térmica	Equipamentos gerais (inclusive plantas *turnkey*)	DEDINI S/A. INDÚSTRIAS DE BASE
		DELP ENGENHARIA MECÂNICA LTDA.
		EQUIPALCOOL SISTEMAS LTDA.
		JOSÉ LUIZ LIMANA ME
		USI - USINAS SOCIAIS INTELIGENTES DESTILARIAS SUSTENTÁVEIS S/A.
	Bio/térmica	BENECKE IRMÃOS & CIA. LTDA.
		CALDEMA EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA.
		EQUIPALCOOL SISTEMAS LTDA.
		LEONIL INDÚSTRIA MECATRÔNICA LTDA.
		TEXAS TURBINAS A VAPOR LTDA.
		TGM TURBINAS INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.

Fonte: elaboração própria a partir de DATAMAQ – ABIMAQ.

Anexo V
Medidas para a promoção da IBKER no Brasil – quadros de referência e síntese

Tabela AV.1 - Medidas para a promoção da IBKER - condicionantes iniciais

Condicionantes de mercado	Os incentivos ambientais e econômicos (de curto prazo) para a adoção destas fontes alternativas no Brasil são relativamente menos intensos em comparação com aqueles presentes nos demais países (devido à alta representatividade da energia hidráulica em nossa matriz) A introdução das fontes alternativas na matriz terá como pré-requisito, portanto, o aumento de sua competitividade perante outras fontes já estabelecidas O principal instrumento para a contratação de energia no mercado regulado continuará sendo o preço mínimo Apesar do caráter complementar das energias em questão, as possibilidades de desenvolvimento ainda são grandes, dada a necessidade de expandir, em mais de 60%, a oferta de energia no Brasil no próximo decênio
Condicionantes tecnológicos	As indústrias associadas a tecnologias destrutivas raramente são estimuladas apenas pela ação dos mecanismos de incentivo e das sinalizações derivadas da atuação das forças de livre mercado. O desenvolvimento das energias renováveis em todo o mundo está fortemente ligado às ações de políticas públicas
Segurança energética	O eixo principal da expansão da oferta no sistema continuará sendo a concorrência entre diversas fontes. Programas de apoio específico serão subordinados à lógica de expansão via contratação por preços mínimos A preocupação com a segurança no abastecimento do sistema impõe certo limite de segurança nas participações isoladas de cada uma das fontes de energias alternativas no sistema

Fonte: Elaboração própria.

Tabela AV.2 - Recomendações de medidas para a promoção da IBKER - fonte eólica

Tipo de instrumento	Ação	Gestor	Como implementar	Resultados almejados
Tributário	Continuidade dos benefícios fiscais associados aos níveis de nacionalização dos equipamentos e às metas de exportação	MF e Governos Estaduais	À medida que a escala de produção e o grau de competitividade dos equipamentos nacionais aumentassem, poder-se-ia estabelecer faixas de benefícios fiscais associados ao aumento do grau de nacionalização dos produtos e a metas específicas de exportação	1) impacto direto inicial na redução de custos e no aumento da competitividade 2) A busca pela continuidade dos benefícios se configuraria em um mecanismo de incentivo para o adensamento da cadeia produtiva nacional 3) Incentivo à exportação de bens de alta tecnologia 4) Como efeito adicional, tais exigências contribuiriam para incentivar a produção doméstica frente à constante ameaça representada pela importação de bens de capital de origem chinesa
Regulação técnica e econômica	Incentivo à geração para o consumo próprio, notadamente em grandes complexos comerciais	ANEEL	A existência de uma regulamentação adequada no que diz respeito ao *net metering* é condição *sine qua non* para que haja sinalizações de mercado que incentivem o nascimento deste segmento de mercado	Incentivo à utilização de fontes de energias renováveis com vistas ao aproveitamento de externalidades positivas (tais como os retornos associados ao "*marketing* ambiental")
Compras governamentais	Estabelecimento de diretrizes de médio e longo prazos acerca da contratação de determinados volumes de energia elétrica derivada da fonte eólica associada aos níveis preestabelecidos de preços por MWh	MME	Estabelecer que para o ano t+5, o volume de energia contratada seria Y gigawatt hora, caso o preço fosse reduzido em x% em comparação ao ano t; estabelecer-se-iam faixas sucessivas, com a quantidade contratada aumentando à medida que a redução dos preços fosse maior	1) Sinalização ao mercado do comprometimento das diretrizes estratégicas de expansão da utilização de energias de fonte eólica na matriz energética brasileira 2) Aumento da capacidade de produção da indústria nacional de bens de capital 3) Incrementos de produtividade por meio do aumento de escala. Política de incentivo ao desenvolvimento tecnológico do setor, tendo em vista as metas de redução de preços
Financiamento	Disponibilidade de programas de apoio financeiro via BNDES aos projetos associados à geração de energia eólica em condições adequadas – no que diz respeito à disponibilidade de recursos, adequação de prazos, custos etc.	BNDES	Poder-se-iam estabelecer faixas de custos de financiamentos associadas a metas específicas de nacionalização de equipamentos e até de exportação dos mesmos	1) Esforços no sentido de promover o adensamento da cadeia produtiva nacional 2) Incentivo à exportação de bens de alta tecnologia

Fonte: Elaboração própria.

Tabela AV.3 - Condicionantes para a promoção do segmento solar fotovoltaico

Condicionantes de mercado	O mercado nacional de energia solar fotovoltaica encontra-se em um nível de desenvolvimento bastante prematuro, comparado ao estágio de desenvolvimento da energia eólica há 10 anos Em virtude das características da matriz energética brasileira, o modelo de fazendas tecnológicas seria pouco viável, sendo preferível o de geração distribuída
Condicionantes tecnológicos	A fim de construir uma indústria local sólida e competitiva, são necessárias capacitações tecnológicas e produtivas em diversos subsegmentos, sendo que em alguns deles a economia brasileira apresenta uma notória deficiência Mesmo com uma virtual expansão sólida da demanda local, as dificuldades para a criação/gestação de empresas nacionais, ao menos nas etapas mais nobres da cadeia, são grandes A despeito das limitações, alguns entrevistados destacaram a competência nacional em projetos, conversores, eletrônica de potência, integração e controle. Adicionalmente, pode-se destacar que o pleno funcionamento da *smart grid* exige competências estabelecidas em automação e *software*, áreas nas quais há agentes nacionais competitivos, inclusive em escala internacional

Fonte: Elaboração própria.

Tabela AV.4 - Recomendações de medidas para a promoção da IBKER - solar fotovoltaico

Tipo de instrumento	Ação	Gestor	Como implementar	Resultados almejados
Tributário	Estabelecimento de um período de isenção tributária para os bens de capital do segmento	MF e Governos Estaduais	Isenção de IPI, PIS/COFINS, II e ICMS. Como contrapartida à isenção de impostos para os componentes e os produtos importados, estabelecer-se-iam cláusulas de transferência tecnológica, bem como metas graduais de nacionalização desses produtos e componentes	1) A isenção tributária atuaria no sentido de reduzir os custos dos investimentos a serem realizados e assim, incentivar o mercado local. Esses custos estariam em torno de R$ 8 mil a R$10 mil para a instalação de um sistema capaz de gerar de 100 a 130 kWh/ mês e seriam diluídos entre 10 e 16 anos 2) Incentivo à demanda local
Regulação técnica e econômica	Regulamentação e estabelecimento de uma *smart grid*	ANEEL	A partir desta regulamentação, seriam estabelecidas as regras de comercialização do excedente de energia para a rede, estabelecendo tarifas de *feed in*, taxação, possibilidade de troca de energia, entre diversos outros fatores	1) Incentivo à demanda residencial 2) Incentivo à autoprodução para estabelecimentos comerciais (*marketing* ambiental) e industriais (menor exposição às flutuações de mercado)
Compras governamentais	Incremento da demanda pública	Governos Federal, Estaduais e Municipais	Estabelecimento de metas mínimas de utilização de energia solar fotovoltaica por parte do poder público e dos concessionários de serviços públicos	1) Sinalização à sociedade e ao mercado do comprometimento do poder público com tais tecnologias 2) Impulso inicial à demanda por bens de capital, o que atuaria no sentido de aumentar a atratividade do mercado brasileiro para fornecedores estrangeiros e potenciais fornecedores nacionais, e de iniciar o processo virtuoso de aumento de escalas de produção e redução de custos dos equipamentos
Financiamento	Garantia de condições de financiamento adequadas à indústria nascente local, seja via BNDES, seja Finep	BNDES e FINEP	Oferta de financiamento em condições adequadas (no que diz respeito ao montante, prazos e custos). Sugere-se apenas uma atenção maior nas demandas associadas ao desenvolvimento tecnológico e na construção de capacitações locais.	1) Incentivo à produção local 2) incentivo indireto ao desenvolvimento tecnológico local

Fonte: Elaboração própria.

Tabela AV.5 - Condicionantes para a promoção do segmento de biomassa

Condicionantes de mercado	A demanda crescente por matéria-prima tem ocasionado a expansão das áreas de cultivo de cana-de-açúcar em direção a regiões cada vez mais distantes das usinas. Esse fato encarece o custo de "coleta" da biomassa e tende a reduzir a competitividade da fonte
Condicionantes tecnológicos	O avanço tecnológico em direção à utilização das técnicas de hidrólise enzimática, no médio prazo, faria com que houvesse uma disputa pela utilização do bagaço e da palha da cana-de-açúcar – bem como de outras fontes de biomassa – para a utilização entre fins concorrentes. Como resultado, mais uma vez, observar-se-ia uma tendência de aumento dos custos da biomassa

Tabela AV.6 - Recomendações de medidas para a promoção da IBKER - biomassa

Tipo de instrumento	Ação	Gestor	Como implementar	Resultados almejados
Tributário	Continuidade da política recém-estabelecida de isenção de ICMS – pelo Estado de São Paulo – para bens de capital necessários para o *retrofit*	Governo do Estado de São Paulo	Defende-se que o governo do Estado de São Paulo estabeleça metas para o grau de nacionalização, exportação e principalmente redução do preço médio da energia ofertada por esta fonte como contrapartida para a isenção do ICMS	1) Incremento da competitividade da fonte quanto para o aumento da demanda por parte do produtor de bens de capital 2) Queda do preço médio das tarifas 3) Incentivo aos avanços tecnológicos na indústria local 4) Incentivo à exportação
Regulação técnica e econômica	Precificação dos custos de distribuição associados à utilização da rede e à perda de energia	ANEEL	Sugere-se que os menores custos associados à utilização da rede de distribuição e à perda de energia sejam computados ao calcular o preço total da energia gerada a partir da biomassa	1) Aumento da competitividade da fonte 2) Aumento da demanda de bens de capital locais
Compras governamentais	Estabelecimento de diretrizes de médio e longo prazos acerca da contratação de determinados volumes de energia elétrica derivada da biomassa associada aos níveis preestabelecidos de preços por MWh	ANEEL	Estabelecer que para o ano t+5, o volume de energia contratada seria Y gigawatt hora, caso o preço fosse reduzido em x% em comparação ao ano t; estabelecer-se-iam faixas sucessivas, com a quantidade contratada aumentando à medida que a redução de preços fosse maior Sugere-se que o processo de expansão seja gradativo e apresente adicionais de energia a ser contratada para cada empresa específica, caso as metas sejam cumpridas	1) Sinalização ao mercado do comprometimento das diretrizes estratégicas de expansão da utilização de energias de biomassa na matriz energética brasileira 2) Aumento da capacidade de produção da indústria nacional de bens de capital 3) Incrementos de produtividade por meio do aumento de escala
Financiamento	Disponibilidade de programas de apoio financeiro via BNDES aos projetos associados à geração de energia a partir da biomassa em condições adequadas	BNDES	Poder-se-iam estabelecer faixas de custos de financiamentos associadas a metas específicas de nacionalização de equipamentos e até de exportação dos mesmos	1) Esforços no sentido de promover o adensamento da cadeia produtiva nacional 2) Incentivo à exportação de bens de alta tecnologia
Mercado	Continuidade da atuação dos agentes da esfera pública nas ações de concentração empresarial no segmento	BNDES e Petrobras	Incentivo às estratégias de centralização por parte do BNDES Continuidade do incremento da atuação da Petrobras no setor	1) A presença de *players* com dimensões financeiras e produtivas maiores também atuaria no sentido de facilitar a coordenação do setor 2) A concentração contribuiria para o incremento de produtividade do setor

Fonte: Elaboração própria.

Tabela AV.7 - Condicionantes para a promoção do segmento PCH

Condicionantes de mercado	A concepção, construção e instalação de um parque eólico, segundo os entrevistados, é um processo menos custoso do que o de uma PCH, que tem impactos na competitividade das fontes. Assim, a complexidade dos estudos de impacto ambiental e a tramitação necessária para a concessão das licenças reduzem a atratividade dessa fonte para os investidores privados perante as demais alternativas Apesar do elevado potencial nacional em fontes hidráulicas, segundo os entrevistados, a disponibilidade de projetos com melhor viabilidade técnica – com quedas d'água mais elevadas – está relativamente escassa. Ou seja, tem-se observado uma tendência de redução da altura das quedas, o que exige maior área de alagamento (fato que pode esbarrar nas limitações impostas pela regulamentação) ou diminui a capacidade de geração de energia para uma determinada turbina
Condicionantes tecnológicos	As perspectivas de incremento da competitividade das PCHs perante outras fontes são relativamente reduzidas. Isso porque, segundo os entrevistados, o grande incremento recente de produtividade deu-se há cerca de seis anos, com avanços na área de automação e controle

Fonte: Elaboração própria.

Tabela AV.8 - Recomendações de medidas para a promoção da IBKER - PCH

Tipo de instrumento	Ação	Gestor	Como implementar	Resultados almejados
Regulação técnica e econômica	Precificação de externalidades ambientais e da menor necessidade de utilização da rede de transmissão	ANEEL	Sugere-se que esse menor impacto seja precificado e permita que, nos leilões do mercado regulado, o preço do MWh gerado pelas PCHs leve em consideração essa precificação Imagina-se que a menor necessidade de utilização da rede de transmissão também deva ser levada em consideração ao estabelecer o preço de contratação da energia nos leilões	1) Maior competitividade da fonte 2) Aumento da demanda por bens de capital
Compras governamentais	Estabelecimento de diretrizes de médio e longo prazos acerca da contratação de determinados volumes de energia elétrica derivada da biomassa associada aos níveis preestabelecidos de preços por MWh	ANEEL	Estabelecer que para o ano t+5, o volume de energia contratada seria Y gigawatt hora, caso o preço fosse reduzido em x% em comparação ao ano t; estabelecer-se-iam faixas sucessivas, com a quantidade contratada aumentando à medida que a redução de preços fosse maior Sugere-se que o processo de expansão seja gradativo e apresente adicionais de energia a ser contratada para cada empresa específica, caso as metas sejam cumpridas	1) Sinalização ao mercado do comprometimento das diretrizes estratégicas de expansão da utilização de energias de PCHs na matriz energética brasileira 2) Aumento da capacidade de produção da indústria nacional de bens de capital 3) Incrementos de produtividade por meio do aumento de escala. Política de incentivo ao desenvolvimento tecnológico do setor, tendo em vista as metas de redução de preços
Financiamento	Disponibilidade de programas de apoio financeiro via BNDES aos projetos associados à geração de energia a partir da biomassa em condições adequadas – no que diz respeito à disponibilidade de recursos, adequação de prazos, custos etc.	BNDES	Poder-se-iam estabelecer faixas de custos de financiamentos associadas a metas específicas de nacionalização de equipamentos e até de exportação dos mesmos	1) Esforços no sentido de promover o adensamento da cadeia produtiva nacional 2) Incentivo à exportação de bens de alta tecnologia

Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA (ABEEOLICA). Análise do marco regulatório para geração eólica no Brasil: 2011. Disponível em: http://www.abeeolica.org.br. Acesso: 17 mar. 2012.

ALVIM FILHO, A. C. Aspectos Tecnológicos das Fontes de Energia Renováveis (Biomassa). In: _____. Colômbia: Cartagena de Indias, 2009.

BRITISH PETROLEUM (BP). Energy Outlook 2030. Londres: British Petroleum, 2011.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). Produção de silício grau solar no Brasil. Nota Técnica. Brasília, DF: CGEE, 2009.

COSTA, R. A.; CASSOTI, B. P.; AZEVEDO, R. L. S. Um panorama da indústria de bens de capital relacionados à energia eólica. BNDES Setorial, n. 29, 2009.

CWEC. Global Wind Report: annual market update 2010. Brussels: Global Wind Energy Council, 2010. Disponível em: http://www.indianwindpower.com/pdf/gwecReport_2010.pdf. Acesso em: 14 dez. 2011.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Plano Decenal de Expansão de Energia 2019. Brasília: MME/EPE, 2010. Disponível em: http://www.epe.gov.br/PDEE/Forms/EPEEstudo.aspx. Acesso em: 04 mar. 2012.

EUROPEAN PHOTOVOLTAIC INDUSTRY ASSOCIATION (EPIA). Solar Generation 6. Solar photovoltaic electricity empowering the world. Bruxelas: EPIA/Greenpeace, 2011. Disponível em: http://www.epia.org/index.php?id=18. Acesso em: 14 mar. 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Key World Energy Statistics. Paris: International Energy Agency, 2010.

LEVA, F. F.; SALERNO, C. H.; CAMACHO, J. R. et al. Modelo de um projeto de um sistema fotovoltaico. In: Procedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, 2004, Campinas (SP) [online]. 2004. Disponí-

vel em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200020&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 14 mar. 2012.

MATHEUS, J. T.; DUTRA, R. M. Avaliação das Perspectivas de Desenvolvimento Tecnológico para a Indústria de Bens de Capital para Energia Renovável: caso da energia eólica. In: Oficina 2 do Projeto PDTS-IBKER. São Paulo: ABDI/FUJB, 2011.

NOGUEIRA, F. J. H.; TIAGO FILHO, G. L. (Org.) Microcentrais hidrelétricas. Itajubá: FAPEPE, 2007.

OLIVEIRA, J. L.; FERREIRA, F. M. Cogeneration: a new source of income for sugar and ethanol mills or bioelectricity - a new business. Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol., v. 27, 2010.

PHOTON INTERNATIONAL. The Solar Power Magazine. Vários números. Disponível em: http://www.photon-international.com/.

RENEWABLE ENERGY POLICY NETWORK FRO THE 21ST CENTURY (REN21). Renewables 2011 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2011. Disponível em: http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf. Acesso em: 21 ago. 2011.

SCHNEIDERNO, H. H. Segmentação do Mercado Fotovoltaico e a sua Cadeia de Fornecimentos. Inova Fotovoltaica, Campinas, Unicamp, 16 mar. 2011.

SOLARBUZZ. Retail Prices Data Base. 2011. Disponível em: http://www.solarbuzz.com/sites/default/files/facts_figs/SB_Retail_Pricing_111208.xlsx. Acesso em: 22 ago. 2011.

WINDFACTS. Wind Energy – The Facts. Research Project 2007-2009. Brussels: European Wind Energy Association, 2009. Disponível em: http://www.wind-energy-the-facts.org/. Acesso em: 2 ago. 2011.