



Programa de Pesquisa e
Desenvolvimento - P&D



Prospecção tecnológica no setor elétrico brasileiro

Volume 3-8

Evolução tecnológica
nacional no segmento de
geração de energia elétrica
e armazenamento de energia

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) edita publicações sobre diversas temáticas que impactam a agenda do Sistema Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (SNCTI).

As edições são alinhadas à missão institucional do Centro de subsidiar os processos de tomada de decisão em temas relacionados à ciência, tecnologia e inovação, por meio de estudos em prospecção e avaliação estratégica baseados em ampla articulação com especialistas e instituições do SNCTI.

As publicações trazem resultados de alguns dos principais trabalhos desenvolvidos pelo Centro, dentro de abordagens como produção de alimentos, formação de recursos humanos, sustentabilidade e energia. Todas estão disponíveis gratuitamente para *download*.

A instituição também produz, semestralmente, a revista Parcerias Estratégicas, que apresenta contribuições de atores do SNCTI para o fortalecimento da área no País.

Você está recebendo uma dessas publicações, mas pode ter acesso a todo o acervo do Centro pelo nosso site: <http://www.cgEE.org.br>.

Boa leitura!



Prospecção tecnológica no setor elétrico brasileiro

Volume 3-8

Evolução tecnológica
nacional no segmento de
geração de energia elétrica
e armazenamento de energia



Brasília – DF
2017

© Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC)

Presidente em exercício

Marcio de Miranda Santos

Diretores

Antonio Carlos Filgueira Galvão

Gerson Gomes

Edição / *Ana Cristina Vilela*

Diagramação e infográficos / *Contexto Gráfico*

Capa / *Eduardo Oliveira*

Projeto Gráfico / *Núcleo de Design Gráfico do CGEE*

Apoio técnico ao projeto / *Márcia Tupinambá*

Catálogo na fonte

C389p

Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: Evolução tecnológica nacional no segmento de geração de energia elétrica e armazenamento de energia. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2017. v.3.

398 p.; il, 24 cm

ISBN: 978-85-5569-134-8 (eletrônico)

1. Geração de Energia Elétrica. 2. Armazenamento de Energia. 3. Construção do Futuro. 4. Rotas Tecnológicas. 5. *Foresight*. I. CGEE. II. ANEEL. III. Título.

CDU 621.611:001.89

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), SCS Qd. 9, Torre C, 4º andar, Ed. Parque Cidade Corporate, CEP: 70308-200 - Brasília, DF, Telefone: (61) 3424 9600, <http://www.cgee.org.br>

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos, desde que seja citada a fonte.

Referência bibliográfica:

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS- CGEE. Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: Evolução tecnológica nacional no segmento de geração de energia elétrica e armazenamento de energia. Brasília, DF: 2017. 398 p.

Esta publicação é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do Contrato Administrativo. Ação Prospecção Tecnológica no Setor de Energia Elétrica. 7.32.51/ANEEL/2015.

Prospecção tecnológica no setor elétrico brasileiro - Volume 3-8 - Evolução tecnológica nacional no segmento de geração de energia elétrica e armazenamento de energia

Supervisão

Gerson Gomes

Coordenação

Ceres Zenaide Barbosa Cavalcanti

Equipe técnica

Alanna Alencar Coelho da Silva

Alexandre Braz Azevedo

Allan Parente Vasconcelos

Amanda Lopes Dantas (Estagiária)

Daniel Haubert de Freitas

Leonardo Ivo de Carvalho Silva

Márcia Tupinambá

Matheus Rafael Passos (Estagiário)

Ricardo Gonçalves Araújo Lima

Os textos apresentados nesta publicação são de responsabilidade dos autores.

Gerente do Projeto

Anderson da Silva Jucá (CESP)

Coordenadora do Projeto

Ceres Zenaide Barbosa Cavalcanti (CGEE)

Equipe da Apine

Celso Maurício Correa

Daniel Costa Braga

Luis Fernando Souza Dias

Luiz Roberto Morgenstern Ferreira

Mauro Antônio Pereira

Régis Augusto Vieira Martins

Membros do Comitê Técnico Gestor

Anderson da Silva Jucá (CESP)

André Pedretti (COPEL DIS)

Antonio Roberto Donadon (CPFL Sul Paulista e CPFL Piratininga)

Carlos Fernando Bley Carneiro (COPEL GeT)

Claudio Homero Ferreira da Silva (CEMIG GT)

Eduardo Heraldo dos Santos Silva (AES Tietê)

Frederico Bruno Ribas Soares (CEMIG GT)

Humberto Fernandes dos Santos (LIGHT)

João Adalberto Pereira (COPEL GeT)

José Tenorio Barreto Junior (LIGHT)

Marcus Vinícius Ferreira de Santana (BAESA e ENERCAN)

Rafael Gomes Bento (CPFL Sul Paulista e CPFL Piratininga)

Sérgio Ishida (CESP)

Vanessa Aparecida Coelho Andrade (CEMIG GT)

Membros do Comitê Consultivo

José Sidnei Colombo Martini (USP)

Sergio de Oliveira Frontin (UnB)

Marciano Morozowski Filho (UFSC)

Membros do Comitê Estratégico

Ailson de Souza Barbosa (Aneel)
Alexandre Viana (CCEE)
André Melo Bacellar (Aneel)
Ary Pinto (CCEE)
Fernando Campagnoli (Aneel)
Gilberto Hollauer (MME)
Jairo José Coura (MCTIC)
José Ricardo Ramos Sales (MDIC)
Luiz Alberto Machado Fortunato (ONS)
Marcos Vinícius Gonçalves da Silva Farinha (EPE)
Renata Nogueira Francisco de Carvalho (EPE)
Roberto Nogueira Fontoura Filho (ONS)
Samira Sana Fernandes de Sousa Carmo (MCTIC)
Ubiratan Francisco Castellano (MME)

COLABORADORES - Participantes do 2º ciclo de reuniões de especialistas

Adriano Lira (Força Eolica Brasil FEB)
Alberto Coralli (COPPE/UFRJ)
Alberto Sergio Kligerman (ONS)
Alécio de Melo Oliveira (CEMIG)
Alexandre Bueno (ABAQUE)
Alina Gilmanova (UNICAMP)
Ana Maria Pimenta de Almeida (ONS)
André Luiz Diniz Souto Lima (Cepel)
André Luiz Rodrigues Osório (EPE)
André Makishi (EPE)
Antonio Oliveira (CGEE)
Antonio Roberto Donadon (CPFL Piratininga)
Carla Kazue Nakao Cavaliero (Unicamp)
Carlos Antonio Levi da Conceição (COPPE)
Carlos Ventura D Alkaine (UFSCAR)
Carlos Vidal (CONTRA)

Carmo Gonçalves (Eletronorte)
Celso Eduardo Lins de Oliveira (USP)
Daniel Araújo (Eletronuclear)
Daniel Faro (CTGAS -ER)
Dante Hollanda (MCTIC)
Diego Pinheiro de Almeida (EPE)
Edvaldo da Silva Carreira (UFRJ)
Electo Eduardo Silva Lora (Unifei)
Eliane Ferreira da Silva (MCTIC)
Ennio Peres da Silva (Unicamp)
Everaldo Feitosa (Eolica Tecnologia)
Fernando Antunes (UFC)
Flávio Rosa (EPE)
Florian Remann (Giz)
Gabriel Konzen (EPE)
Gerhard Ett (Electrocell)
Gustavo Ponte (EPE)
Heloísa Cunha Furtado (Cepel)
Ivan Salati (ABEN)
Jairo Coura (MCTIC)
Jean Paul Terra Prates (CERNE)
João Maria Marra (Itaipu - Binacional)
João Roberto Loureiro de Mattos (CDTN)
João Victor Caracas (Enova Energia)
Joaquim Pinheiro (Eletronorte)
José Mario Moraes e Silva (Institutos Lactec)
José Roberto Simões Moreira (USP)
Jurandir Itizo (USP)
Luis Fernando do Badanuhm (MME)
Luiz Alberto Procopiak (COPEL GeT)
Luiz Antonio de Souza Ribeiro (UFMA)
Luiz Carlos Siqueira (Eletronuclear)
Maamar Robrini (UFPA)

Marcelo Pinho Almeida (IEE/USP)
Marcelo Poppe (CGEE)
Marcelo Wendel (EPE)
Marciano Morozowski Filho (NJT TEC Consultoria Ltda)
Marcos Costa (Giz)
Maria Candida Abid Lima (ONS)
Maria de Fátima Rosolem (CPQD)
Milad Shadman (UFRJ)
Oswaldo Ronald Saavedra Mendez (UFMA)
Paulo Alexandre Ferreira (Aeroespacial Engenharia)
Paulo Rasi (Eletronorte)
Paulo Roberto Costa (Seahorse Wave Energy)
Pedro André Carvalho Rosas (UFPE)
Pedro Eduardo P. Assis (PASys Engenharia e Sistemas)
Rafael Malheiro Ferreira (Seahorse Wave Energy)
Raul Fernando Beck (CPQD)
Ronaldo Gonçalves dos Santos (FEI)
Samira Sana Fernandes de Sousa Carmo (MCTIC)
Segen Estefen (UFRJ)
Sergio de Oliveira Frontin (UnB)
Sergio Menezes Medeiros (ONS)
Sérgio Scramin (EPE)
Takao Hara (Hara Engenharia)
Tiago Bandeira Marchesan (UFSM)
Vladimir Cobas (Unifei)
Willian Lopes do Nascimento (ABEEOLICA)

COLABORADORES - Contribuições nos Textos

Alexandre Francisco Maia Bueno (ABAQUE)
Gerhard Ett (Electrocell)
João Roberto Loureiro de Mattos (CDTN)
Jurandir Itizo Yanagiraha (USP)
Marcelo Pinho Almeida (IEE/USP)

Oswaldo Ronald Saavedra Mendes (UFMA)

Pedro André Carvalho Rosas (UFPE)

Segen Farid Stefen (UFRJ)

Takao Hara (Hara Engenharia)

Vladimir Rafael Melian Cobas (Unifei)

Sumário

Resumo Executivo	19
------------------	----

Capítulo 1

Introdução

1.1. Contexto	29
1.2. O Projeto	30
1.2.1. Objetivo do projeto	31
1.2.2. Metodologia do projeto	31
1.3. Governança do projeto	32
1.4. Objetivo do Livro	33
1.5. Conceitos das macrotemáticas	34
1.6. Abordagem dos capítulos	37
1.7. Análise geral do grupo Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia (tendências internacionais e nacionais)	38

Capítulo 2

Metodologia da etapa construção do futuro

2.1. Processo de construção do futuro	69
2.2. Diretrizes: Visão de futuro	70
2.2.1. Cenário setorial geral	70
2.2.2. Visão de futuro específica para cada macrotemática	71
2.3. Desenvolvimento	72
2.3.1. Mapa do conhecimento	72
2.3.2. Fundamentação da evolução das rotas	76

2.3.3. Evolução da maturidade tecnológica	79
2.3.4. Priorização	82
2.4. Construção dos <i>roadmaps</i>	82
2.5. Execução do processo	85
2.5.1. Fase balizamento	86
2.5.2. Desenvolvimento	86
2.5.3. Ajustes finais	89

Capítulo 3

Macrotemática Energia Eólica

3.1. Visão de futuro	95
3.1.1. Cenário setorial	95
3.1.2. Objetivo geral	96
3.1.3. Objetivo específico	96
3.1.4. Fundamentação	97
3.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	99
3.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	101
3.3.1. Temática: previsão e planejamento	101
3.3.2. Temática: implantação, manutenção e descomissionamento	105
3.3.3. Temática: monitoramento e operação	108
3.3.4. Temática: equipamentos e sistemas	111
3.4. Priorização	115

Capítulo 4

Macrotemática Energia Solar Fotovoltaica

4.1. Visão de futuro	120
4.1.1. Cenário setorial	120
4.1.2. Objetivo geral	121
4.1.3. Objetivo específico	121
4.1.4. Fundamentação	122
4.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	126
4.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	127
4.3.1. Temática componentes	127
4.3.2. Temática recurso solar	133
4.3.3. Temática sistemas	134
4.4. Priorização	139

Capítulo 5

Macrotemática Energia Solar Heliotérmica

5.1. Visão de futuro	144
5.1.1. Cenário setorial	144
5.1.2. Objetivo geral	144
5.1.3. Objetivo específico	145
5.1.4. Fundamentação	146
5.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	150
5.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	153
5.3.1. Temática estudo do recurso	153
5.3.2. Temática sistemas CSP	155
5.4. Priorização	159

Capítulo 6

Macrotemática Energia dos Oceanos

6.1. Visão de futuro	165
6.1.1. Cenário setorial	165
6.1.2. Objetivo geral	166
6.1.3. Objetivo específico	166
6.1.4. Fundamentação	167
6.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	168
6.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	169
6.3.1. Temática energia das ondas	169
6.3.2. Temática amplitude de marés	173
6.3.3. Temática correntes de marés e oceânicas	174
6.3.4. Temática gradiente de temperatura	178
6.3.5. Temática gradiente de salinidade	181
6.4. Priorização	182

Capítulo 7

Macrotemática Termoeletricidade Renovável e não Renovável

7.1. Visão de futuro	191
7.1.1. Cenário setorial	191
7.1.2. Objetivo geral	192
7.1.3. Objetivo específico	192
7.1.4. Fundamentação	193
7.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	195
7.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	196
7.3.1. Temática combustíveis	196
7.3.2. Temática sistemas de conversão	205
7.4. Priorização	210

Capítulo 8

Macrotemática Hidrogênio e Célula a Combustível

8.1. Visão de futuro	217
8.1.1. Cenário setorial	217
8.1.2. Objetivo geral	219
8.1.3. Objetivo específico	220
8.1.4. Fundamentação	221
8.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	222
8.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	223
8.3.1. Temática geração de energia elétrica via células a combustível	223
8.3.2. Temática produção do hidrogênio	233
8.3.3. Temática tecnologias de armazenamento	242
8.4. Priorização	250

Capítulo 9

Macrotemática Geração Hidroelétrica

9.1. Visão de futuro	257
9.1.1. Cenário setorial	257
9.1.2. Objetivo geral	257
9.1.3. Objetivo específico	257
9.1.4. Fundamentação	259
9.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	259
9.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	261
9.3.1. Temática planejamento, monitoramento e operação	262
9.3.2. Temática equipamentos	267
9.4. Priorização	273

Capítulo 10

Macrotemática Energia Nuclear

10.1. Visão de futuro	279
10.1.1. Cenário setorial	279
10.1.2. Objetivo geral	279
10.1.3. Objetivo específico	280
10.1.4. Fundamentação	281
10.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	285
10.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	289
10.3.1. Temática tecnologias de reatores	289
10.3.2. Temática ciclo do combustível nuclear	293
10.3.3. Temática descomissionamento	296
10.4. Priorização	298

Capítulo 11

Macrotemática Armazenamento de Energia

11.1. Visão de futuro	305
11.1.1. Cenário setorial	305
11.1.2. Objetivo geral	305
11.1.3. Objetivo específico	306
11.1.4. Fundamentação	307
11.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	308
11.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	311
11.3.1. Temática armazenamento elétrico	312
11.3.2. Temática armazenamento eletroquímico – baterias	315
11.3.3. Temática sistemas de armazenamento térmico	317
11.3.4. Temática sistemas de armazenamento mecânico	322
11.3.5. Temática armazenamento químico	327
11.3.6. Temática O&M – desenvolvimento de aplicações	329
11.4. Priorização	331

Capítulo 12

Macrotemática Soluções Apropriadas de Geração de Eletricidade em Regiões Remotas

12.1. Visão de futuro	340
12.1.1. Cenário setorial	340
12.1.2. Objetivo geral	341
12.1.3. Objetivo específico	341
12.1.4. Fundamentação	342
12.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro	344
12.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas	348
12.3.1. Temática sistemas isolados	348
12.3.2. Temática sistemas conectados ao SIN	358
12.4. Priorização	367
Referências bibliográficas	371
Anexo - Planilha de indicadores	383
Lista de Figuras	387
Lista de Gráfico	389
Lista de Tabelas	394
Lista de siglas e abreviaturas	397



Resumo Executivo

A diversificação dos sistemas de geração no Brasil não só ampliará a capacidade de geração de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), como também será imprescindível ao desenvolvimento da Geração Distribuída (GD) e à evolução dos sistemas presentes nas regiões remotas (sistemas isolados e pontas de rede). Essa realidade exigirá o desenvolvimento de sistemas de integração entre fontes e o mapeamento dos recursos energéticos, e exigirá a implementação de novos sistemas de monitoramento e operação do SIN.

A intermitência das fontes renováveis é uma questão a ser resolvida. Neste contexto, a implementação de sistemas de armazenamento de energia inovadores se torna imprescindível para gerar a despachabilidade da energia elétrica proveniente principalmente das fontes eólica, solar fotovoltaica e dos oceanos, presentes no SIN. Nos sistemas GD e em regiões remotas as tecnologias inovadoras de armazenamento de energia possuirão o mesmo papel.

Considerando-se esse cenário, e o aporte em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), via programas como o P&D da Agência Nacional de Energia Elétrica (P&D Aneel), o futuro das tecnologias de geração de eletricidade e das tecnologias de armazenamento de energia é caracterizado conforme apresentado a seguir.

Energia eólica

- **Visão de futuro:** desenvolvimento de turbinas eólicas com novos materiais, novos conceitos e ruptura tecnológica, de micro a grande porte, com componentes nacionais, além do desenvolvimento de tecnologias dedicadas à previsibilidade da geração de energia elétrica a partir da fonte eólica.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática energia eólica dizem respeito ao aumento de escala dos aerogeradores, novos desenhos de turbinas para atenderem a GD e as regiões remotas, elevação da eficiência de conversão de energia e a confiabilidade dos equipamentos (turbina, sistemas de monitoramento e operação e tecnologias de gestão de ativos). Nesse contexto, a maior parte das tecnologias associadas à fonte eólica alcançará maturidade comercial na década de 2050. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos

seguintes fatores:¹ geração do mapa eólico nacional, Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) e cadeia produtiva estruturadas (RH, laboratórios, centros de pesquisa), sistemas de operação e monitoramento avançados, sistemas de armazenamento de energia avançados, além do fomento contínuo ao desenvolvimento tecnológico ligado à fonte.

- **Rotas prioritizadas:** para atender à demanda futura por essa fonte, os investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) devem priorizar em curto e médio prazos as tecnologias de previsão e planejamento para a geração de médio e grande portes, monitoramento e operação de médio e grande portes e otimização de equipamentos e sistemas de médio porte.

Energia solar fotovoltaica

- **Visão de futuro:** os investimentos em PD&I deverão focar no desenvolvimento nacional de componentes e equipamentos, em particular nas tecnologias relacionadas ao *Balance-of-System* (BoS); no melhoramento dos processos produtivos e de controle de qualidade pré e pós-operacionais e em tecnologias relacionadas à integração com o sistema elétrico e à previsão do uso da fonte.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática energia solar fotovoltaica dizem respeito ao desenvolvimento ou aprimoramento dos sistemas BoS, novas tecnologias para o estudo e o mapeamento do recurso solar, novas tecnologias para a integração dos sistemas fotovoltaicos a outras fontes de energia e aos sistemas de armazenamento (GD, Sistema Interligado Nacional - SIN e regiões remotas) e o aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos, associado à diminuição dos custos de fabricação. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à fonte solar fotovoltaica alcançará maturidade comercial na década de 2040. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: CT&I e cadeia produtiva estruturadas (RH, laboratórios e centros de pesquisa), fomento à pesquisa, centro de coordenação entre instituições-chaves (CT&I, cadeia produtiva, governança e setor elétrico), abertura de mercado, sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento desenvolvidos, e GD e *smart grid* desenvolvidos.
- **Rotas prioritizadas:** para atender à demanda futura por essa fonte, os investimentos em PD&I devem priorizar em curto e médio prazos o desenvolvimento de sistemas BoS, tecnologias para o mapeamento do recurso solar e o desenvolvimento de tecnologias para a integração da fonte solar fotovoltaica no SIN, com a geração centralizada, GD e em regiões remotas.

1 Fatores portadores de futuro.



Energia solar heliotérmica

- **Visão de futuro:** desenvolver tecnologia nacional de sistemas de geração heliotérmica por meio de plantas operacionais com vistas a alcançar competitividade dessa fonte no setor elétrico e fomentar a indústria nacional.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática energia solar heliotérmica dizem respeito ao estudo do recurso solar, desenvolvimento de tecnologias de medição e caracterização do recurso solar, desenvolvimento de sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento de energia, otimização das tecnologias do sistema de geração heliotérmico (espelhos, conversores de energia e demais sistemas) e desenvolvimento de tecnologias que atendem a GD, química solar e regiões remotas. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à fonte solar heliotérmica alcançará maturidade comercial na década de 2050. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: CT&I e cadeia produtiva desenvolvidas para essas tecnologias, caracterização do recurso solar e das regiões passivas do uso da tecnologia heliotérmica, desenvolvimento da GD e da geração em regiões remotas, desenvolvimento da química solar, desenvolvimento de tecnologias de integração das fontes e integração com os sistemas de armazenamento de energia.
- **Rotas prioritizadas:** para atender à demanda futura por essa fonte, os investimentos em PD&I devem priorizar em curto e médio prazos os estudos e as tecnologias sobre a caracterização do recurso solar no Brasil, tecnologias de aplicação dos sistemas heliotérmicos na GD, química solar, armazenamento de energia e sistemas híbrido, e otimização de sistemas de geração heliotérmica por ponto focal e linha focal.

Geração de energia elétrica via hidrogênio e/ou célula a combustível

- **Visão de futuro:** o foco dos investimentos em PD&I está no desenvolvimento de tecnologias de implementação do hidrogênio na produção de energia elétrica (a partir de células a combustível) e no desenvolvimento de tecnologia nacional para a produção de hidrogênio renovável de baixo custo, por exemplo, a partir do biogás, para uso em células a combustível. Também é foco da PD&I o desenvolvimento de tecnologias que garantam elevada durabilidade (> 40.000 horas) dos sistemas de geração via hidrogênio em células a combustível.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática geração de energia elétrica via hidrogênio e/ou célula a combustível dizem respeito às tecnologias de geração de energia elétrica via

hidrogênio e/ou célula a combustível, sistemas de produção do hidrogênio e sistemas de armazenamento do hidrogênio. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial na década de 2040. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: CT&I e cadeia produtiva estruturadas, GD estruturada, sistemas avançados de cogeração, sistemas de integração das fontes e com sistemas de armazenamento de energia desenvolvidos e tecnologias avançada para a manufatura dos sistemas de produção do hidrogênio, produção das células a combustível e de produção dos meios de armazenamento do hidrogênio.

- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura por essa fonte, os investimentos em PD&I devem priorizar em curto e médio prazos o aumento da eficiência de células a combustível do tipo SOFC e PEM, e otimizar os processos de fabricação desses componentes com foco nos custos, desenvolver tecnologias para o armazenamento do hidrogênio comprimido, e desenvolver ou otimizar tecnologias de produção do hidrogênio via eletrolisadores de óxidos sólidos, gaseificação e reforma a vapor, eletrolisadores de membrana polimérica e eletrolisador alcalino.

Geração termoelétrica

- **Visão de futuro:** as pesquisas na área de geração termoelétrica (SIN, cogeração, isolados e GD) devem focar no uso do gás natural, biomassa, carvão e resíduos sólidos urbanos (RSU) no sistema elétrico brasileiro por meio de tecnologias avançadas, levando-se em conta o aumento da eficiência e a mitigação das emissões. Também é foco da PD&I o desenvolvimento ou a otimização de tecnologias com o papel de fornecer flexibilidade operativa ao sistema, tendo importante função na garantia das condições de suprimento para o beneficiamento de insumos energéticos.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática geração termoelétrica dizem respeito ao desenvolvimento de combustíveis e ao estudo do recurso energético e à otimização ou melhoramento dos sistemas de conversão de energia, considerando-se os motores alternativos, ciclos com turbinas e tecnologias de cogeração. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial nas décadas de 2030 e 2040. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: estudos avançados sobre o mapeamento das fontes energéticas, tecnologias avançadas de processamento da biomassa, tecnologias avançadas para a produção de novos combustíveis a partir da biomassa e dos combustíveis fósseis, CT&I e cadeia produtiva estruturadas, novos materiais com elevada resistência metalúrgica e a altas temperaturas,



sistemas avançados de controle e sistemas avançados de integração de fontes e com os sistemas de armazenamento.

- **Rotas prioritizadas:** para atender à demanda futura por essa fonte, os investimentos em PD&I devem priorizar em curto e médio prazos o desenvolvimento de combustíveis a partir da biomassa, o estudo e a caracterização dos recursos energéticos, a otimização dos sistemas de geração via ciclo a turbina (vapor e gás) e o desenvolvimento ou otimização dos sistemas de cogeração.

Geração hidroelétrica

- **Visão de futuro:** desenvolver tecnologias de turbinas dedicadas às usinas de baixa queda e às usinas reversíveis. Também devem ser desenvolvidas tecnologias de manutenção de ativos e de eficiência energética para novas usinas, além de tecnologias para a modernização do parque atual.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática geração hidroelétrica dizem respeito às tecnologias de planejamento, monitoração e operação dos sistemas de geração hidráulica, envolvendo o projeto civil, sistemas de Operação e Manutenção (O&M) e tecnologias de interação entre o empreendimento e o meio ambiente; dizem respeito ao estudo do recurso hidráulico e às tecnologias envolvidas nesse estudo, e referem-se ao desenvolvimento ou à otimização dos sistemas de geração de energia hidráulica (turbinas de grande, médio e pequeno portes, turbinas hidrocínéticas, turbinas de baixa queda e equipamentos de usinas reversíveis). Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial nas décadas de 2040 e 2050. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: estudos avançados sobre a caracterização das fontes energéticas, novos materiais para a construção civil, sistemas de integração entre fontes desenvolvidos, turbinas de baixa queda e de grande vazão desenvolvidas, tecnologias avançadas para a otimização de máquinas de geração (repotenciação) e avançados sistemas de O&M e operação para a usina, além de estudos avançados para mitigar os danos no meio ambiente e na usina causados pela interação do empreendimento com o ambiente.
- **Rotas prioritizadas:** para atender à demanda futura por essa fonte, os investimentos em PD&I devem priorizar em curto e médio prazos as tecnologias de interação do meio ambiente com a usina hidráulica, o desenvolvimento de usinas reversíveis, o estudo do recurso hidráulico, o desenvolvimento de usinas com turbinas hidrocínéticas e o melhoramento ou a otimização de sistemas de O&M para usinas.

Soluções apropriadas para a geração de energia elétrica em regiões remotas

- **Visão de futuro:** o foco dos investimentos em PD&I está direcionado ao desenvolvimento de tecnologias de integração de fontes energéticas para atenderem aos sistemas observados em regiões remotas (isolados e conectados ao SIN, com ou sem GD). Neste contexto, deve ser dada ênfase ao desenvolvimento de tecnologias e dispositivos para atingir alta confiabilidade de serviço elétrico. Na operação de sistemas de geração em regiões remotas, o investimento em PD&I deve ser direcionado ao desenvolvimento de componentes de integração entre fontes e entre sistemas de armazenamento, e deve ser direcionado aos sistemas de O&M e monitoramentos dos sistemas de geração.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas desta macrotemática dizem respeito às potencialidades energéticas, tecnologias e composição dos sistemas de geração e tecnologias de gestão dos sistemas de geração no âmbito dos sistemas isolados (geração concentrada e descentralizada) e dos sistemas conectados ao SIN (geração de auxílio em ponta de rede e GD rural). Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial na década de 2040. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: mapeamento dos recursos energéticos, tecnologias de integração entre fontes e armazenamento de energia estruturadas e ativas, mapeamento dos melhores arranjos para os sistemas e geração e armazenamento de energia e GD desenvolvida.
- **Rotas priorizadas:** para atender a demanda futura por essa fonte, os investimentos em PD&I devem priorizar em curto e médio prazos o mapeamento dos recursos energéticos para o atendimento às regiões remotas, novas tecnologias de integração entre fontes e de sistemas de geração de energia elétrica, novas tecnologias para o armazenamento de energia e tecnologias de gestão de ativos avançadas.

Energia nuclear

- **Visão de futuro:** aumentar a competitividade e reduzir o custo da geração nucleoeletrica pelo aumento de desempenho e extensão de vida das usinas existentes, desenvolvimento, aprimoramento ou adequação de processos, requisitos e tecnologias para a escolha das novas usinas e dos seus respectivos sítios, nacionalização de componentes e processos de fabricação de elementos combustíveis, gestão de rejeitos e de combustíveis usados e seleção de tecnologias de descomissionamento e desenvolvimento, onde couber, de reatores nucleares de variados portes.



- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica desta macrotemática dizem respeito à otimização das tecnologias de geração nuclear *Pressurized Water Reactor* -(PWR) Geração II e PWR Geração III, ao desenvolvimento de tecnologias do ciclo do combustível nuclear (Elemento Combustível Geração II e Elemento Combustível Geração III) e ao desenvolvimento de tecnologias de descomissionamento de usinas nucleares. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial na década de 2040. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: fomento ao desenvolvimento da CT&I e da cadeia produtiva, fomento à popularização da fonte nuclear, desenvolvimento de laboratórios de testes em padrão internacional e fomento ao *Brazilian Utility Requirement (BUR)*.
- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura por essa fonte, os investimentos em PD&I devem priorizar em curto e médio prazos a otimização de tecnologias PWR de 2º geração, elemento combustível de 2º geração e a otimização e o desenvolvimento de tecnologias de descomissionamento de usinas nucleares.

Energia dos oceanos

- **Visão de futuro:** o foco da PD&I está em desenvolver tecnologias nacionais de geração de eletricidade via energia das ondas (coluna de água oscilante, corpo oscilante) e das marés (amplitude e corrente de maré) por meio de plantas operacionais. Em longo prazo, o foco da PD&I está em desenvolver tecnologias nacionais de geração de eletricidade via gradientes térmico e de salinidade.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas desta macrotemática dizem respeito ao desenvolvimento de tecnologias de conversão da energia oceânica em energia elétrica (sistemas de conversão da energia das ondas, amplitude de marés, correntes de marés e oceânicas, gradiente de salinidade, gradiente de temperatura) e ao desenvolvimento de tecnologias de mapeamento do recurso oceânico. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial na década de 2040. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: investimentos em CT&I e em cadeia produtiva, desenvolvimento dos mapas dos recursos energéticos, dos sistemas de integração de fontes e com os sistemas de armazenamento de energia maduros, de novos materiais (leves, resistentes e anticorrosivos), de sistemas de O&M e de monitoramento adaptados às condições de operação dos sistemas marinhos.

- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura por essa fonte, os investimentos em PD&I devem priorizar em curto e médio prazos o desenvolvimento das rotas de geração de energia a partir da energia das ondas, da amplitude de marés, das correntes de marés e oceânicas, e o desenvolvimento de tecnologias para a geração a partir do gradiente de temperatura do oceano.

Armazenamento de energia

- **Visão de futuro:** desenvolver soluções e incentivar o desenvolvimento da tecnologia nacional de sistemas de Armazenamento de Energia de grande porte, capazes de mitigar a intermitência das fontes que apresentem esta característica (eólica e solar fotovoltaica de grande porte), buscando elevar a segurança da inserção dessa fonte no sistema interligado nacional. Desenvolver tecnologia nacional para Sistemas de Armazenamento de Energia capazes de mitigar a intermitência da GD (majoritariamente solar fotovoltaica), buscando elevar sua confiabilidade, segurança e modularidade e ainda a redução de custo dos Sistemas de Armazenamento de Energia distribuídos (médio e pequeno portes). Desenvolver tecnologia nacional para Sistemas de Armazenamento de Energia capazes de viabilizar o desenvolvimento e a implantação de microrredes, buscando elevar a confiabilidade e a segurança operativa das redes de distribuição e que assegurem a confiabilidade, a modularidade e a redução de custo dos Sistemas de Armazenamento de Energia distribuídos (médio e pequeno portes).
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas desta macrotemática dizem respeito ao desenvolvimento ou à otimização de sistemas de armazenamento mecânico, elétrico, eletroquímico, térmico e químico e, também, ao desenvolvimento ou à otimização das tecnologias O&M. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial na década de 2040. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: desenvolvimento da GD, planejamento de inserção das usinas reversíveis no SIN, desenvolvimento dos parques eólicos e das usinas solares, desenvolvimento de sistemas de integração do sistema de armazenamento com as fontes de energia, desenvolvimento de sistemas de O&M e monitoramento (*Battery Management Systems - BMS*, principalmente).
- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura por essa fonte, os investimentos em PD&I devem priorizar em curto e médio prazos o desenvolvimento dos sistemas BMS, de baterias com maior tempo de carga e confiabilidade (além dos sistemas de clusterização) e das tecnologias de bombeamento reverso.



Capítulo 1



Capítulo 1

Introdução

1.1. Contexto

Os estudos de futuro são muito utilizados por diferentes países na construção de sua estratégia de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I), especialmente na seleção de onde e como aportar os recursos de fomento à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I). O Brasil possui tradição nos estudos de planejamento elétrico que projetam demanda e oferta de energia elétrica. Com base neles, analisa-se a necessidade de investimento na infraestrutura do setor. No entanto, o mesmo não é tradicionalmente realizado na construção da estratégia de investimentos de CT&I para o setor elétrico.

Desde meados da década de 1990, o governo federal brasileiro redireciona as políticas de CT&I para o setor produtivo com a intenção de intensificar as atividades de inovação nas empresas. Os Fundos Setoriais de Ciência e Tecnologia (Lei nº 11.540/2007), a Lei de Inovação (Lei nº 10.973/2004) e a Lei do Bem (Lei nº 11.196/2005) são exemplos desse esforço. O governo brasileiro algumas vezes utiliza-se de estudos prospectivos como os vários realizados sobre temas específicos encomendados ao CGEE pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTI) ao longo dos últimos anos. Todavia não há um processo definido e nem um estudo amplo setorial que identifiquem oportunidades e, desta forma, selecionem em qual área se deve aprofundar.

O planejamento da CT&I vem se tornando uma preocupação cada vez maior entre os agentes. Um levantamento anterior do CGEE (2015) mostra que as empresas do setor também reconhecem a importância dos estudos de prospecção focados na priorização de temáticas voltadas para a melhoria da eficácia do Programa de P&D regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Os exercícios de projeção de consumo realizados pelo governo e de forma independente por outros

agentes indicam uma necessidade de crescimento de capacidade instalada acima de 300%² para 2050. Isso impõe o desafio para o PD&I do setor que deverá estimular avanços e inovações, mas também grandes oportunidades de novos negócios para o setor e toda a sua cadeia produtiva. Neste contexto, nasceu a proposta do projeto *Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica*.

1.2. O Projeto

A equipe da Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, responsável por acompanhar o Programa de P&D do setor elétrico (Lei nº 9.991/2000), preocupa-se em definir uma estratégia para o programa, visando gerar resultados mais eficientes. Para auxiliá-los com este objetivo, a própria equipe idealizou o projeto *Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica*.

Neste contexto, a Aneel solicitou uma proposta ao CGEE. A proposta do estudo, aceita pela Aneel, busca identificar e selecionar temáticas de PD&I no setor elétrico que desenvolvam soluções para vencer os futuros desafios do setor. Objetiva ainda identificar quais são as possíveis ações de CT&I necessárias para otimizar os recursos do Programa de P&D regulado pela Aneel no fomento ao desenvolvimento dessas temáticas.

A proposta foi apresentada às empresas do setor elétrico, que possuem recursos para aplicar no programa P&D regulado pela ANEEL, para que fossem identificados os possíveis interessados em financiar o projeto. Iniciou-se, então, um processo de articulação entre a CGEE, a Associação Brasileira dos Produtores Independentes de Energia Elétrica (Apine), que liderou o processo junto às empresas, e as empresas interessadas para desenhar a proposta final e o contrato de serviço. O resultado foi o estabelecimento de um contrato de 11 empresas³ do setor com as executoras, a Apine e o CGEE. A primeira ficou responsável pela interação das partes e a segunda, pela parte técnica do estudo.

A Aneel, por meio da Nota Técnica nº 0095/2014-SPE/ANEEL, retificada pelo ofício 0203/2016 - SPE/ANEEL (19/agosto/2016), autorizou o uso de recursos do Programa de P&D, regulado por essa agência, para o desenvolvimento do projeto. Os resultados não somente subsidiarão a definição de temas estratégicos e projetos prioritários para a Aneel, como também auxiliarão o MCTI e o Ministério de Minas e Energia (MME) no processo de formulação de políticas públicas voltadas ao setor de energia nacional.

2 Ano base: 2015.

3 AES; Baesa; Cemig GT; Cesp; Copel DIS; Copel GeT; CPFL Piratininga; CPFL Sul Paulista; Enercan; e Light.



1.2.1. Objetivo do projeto

O Projeto⁴ Prospecção Tecnológica no Setor de Energia Elétrica tem por objetivo construir propostas de ações de Ciência, Tecnologia e Inovação (CT&I) para o direcionamento dos recursos do Programa de P&D, regulado pela Aneel.

O foco deve ser no desenvolvimento da CT&I no setor de energia elétrica nacional, buscando o crescimento da participação da tecnologia nacional ou, quando couber, a transferência com absorção de tecnologia estrangeira, promovendo a competitividade das empresas de energia e suas respectivas cadeias produtivas no Brasil.

Conforme dispõe o contrato (001/2014) e retificado no Ofício 0203/2016 - SPE/Aneel, o foco do estudo é o setor de energia elétrica⁵. Assim, combustíveis, eficiência energética e demais temáticas gerais serão considerados no contexto de energia elétrica.

Para facilitar a operação do trabalho, o estudo foi dividido em cinco grupos temáticos⁶: Grupo 1 - Geração de energia elétrica e Armazenamento de energia; Grupo 2 - Transmissão de energia elétrica; Grupo 3 - Distribuição de energia elétrica; Grupo 4 - Eficiência energética; Grupo 5 - Assuntos Sistêmicos.

1.2.2. Metodologia do projeto

Atualmente, os estudos de futuros são entendidos como um resultado sistêmico de múltiplos fatores e as decisões devem levar em conta elementos de cunho político-sociais e não apenas obedecer a resultados técnicos. Ao enfatizar-se a importância da combinação de resultados de diversos métodos, ganha-se em flexibilidade e reduz-se o caráter determinista tradicionalmente associado ao *forecasting*.

O estudo *Prospecção tecnológica no Setor de Energia Elétrica* faz uso dos diferentes métodos, mas utiliza o *foresight* como base, tendo em vista a dificuldade e o risco de realizar estudos de cunho muito determinísticos para definir uma estratégia de P&D sem um objetivo previamente delineado.

4 Convênio: CP&D001/2014; identificação no CGEE: 7.32.51.01.01; cadastro na Aneel: PED-0061-0046/2014.

5 Inicialmente excluía a energia nuclear, que passou a ser incluída conforme decisões, constando em ata, das reuniões do comitê Técnico do projeto e retificado pelo Ofício 0203/2016 – SPE/ANEEL.

6 A proposta inicial descrita no contrato 001/2014 foi alterada e retificado nas reuniões do comitê técnico gestor (Conforme descrito na ata da reunião de abertura do projeto, realizada no dia 07/08/2015) e do ofício 0203/2016 – SPE/ANEEL.

O processo básico de *foresight* encontrado na literatura se divide em 3 etapas: diagnóstico, prognóstico e prescrição. Para facilitar o detalhamento da metodologia proposta, o projeto adaptou e dividiu o processo em quatro etapas:

- Diagnóstico;
- Construção do Futuro;
- Posicionamento;
- Consolidação final.

A etapa do diagnóstico busca identificar opções temáticas, a sua situação, potencialidades e dificuldades associadas. Com base nas análises dessas informações, inicia-se o processo de construção do futuro, o qual descreve a visão de futuro, a evolução da maturidade, as trajetórias tecnológicas e priorização das rotas tecnológicas. O mapa do conhecimento descreve as linhas de PD&I para as diferentes áreas temáticas. Esse mapa, resultante da primeira etapa e revisado na segunda etapa do processo, associado às informações levantadas ao longo do projeto, será o objeto de detalhamento do planejamento estratégico (posicionamento) que finaliza com a construção da agenda. Conclui-se com a consolidação de todo o processo por meio da construção dos documentos finais.

1.3. Governança do projeto

O projeto foi dimensionado para apresentar diversos produtos com o objetivo de promover um processo de validação ao longo do estudo por três comitês diferentes de acompanhamento com perfis distintos. São eles:

- a) Comitê técnico gestor das empresas⁷: Formado por representantes das empresas parceiras que financiam o projeto, tem o objetivo de acompanhar tecnicamente e comandar a parte de gestão do projeto;

7 AES; Baesa, Cemig GT; Cesp; Copel DIS; Copel GeT; CPFL Piratininga; CPFL Sul Paulista; Enercan; e Light.



- b) Comitê estratégico⁸: Formado por representantes das instituições que compõem a governança do setor, tem o objetivo de acompanhar tecnicamente o projeto de forma a alinhar as estratégias setoriais;
- c) Comitê consultivo⁹: Formado por especialistas seniores do setor, tem o objetivo de acompanhar tecnicamente o projeto, representando a Academia.

1.4. Objetivo do Livro

O livro aborda os resultados da etapa construção de futuro para as 10 macrotemáticas pertencentes ao grupo temático Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia e faz parte da coletânea de oito livros, que compõem os resultados do Projeto Prospecção Tecnológica no Setor de Energia Elétrica. Sendo eles:

- Documento executivo
- Diagnóstico da CT&I no setor elétrico brasileiro
- Evolução tecnológica nacional no segmento de geração de energia elétrica e armazenamento de energia
- Evolução tecnológica nacional no segmento de transmissão de energia elétrica
- Evolução tecnológica nacional no segmento de distribuição de energia elétrica
- Evolução tecnológica nacional no segmento de eficiência energética
- Evolução tecnológica nacional no segmento de assuntos sistêmicos do setor de energia elétrica
- Agenda estratégica de CT&I no setor elétrico brasileiro

Como resultados da etapa construção de futuro, o livro apresenta a visão de futuro das macrotemáticas, o estudo de prospecção das tecnologias trabalhadas nas rotas tecnológicas (*roadmaps tecnológicas*) e a priorização dessas rotas para os investimentos de P&D no setor elétrico.

8 Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel); Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE); Empresa de Pesquisa Energética (EPE); Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC); Ministério de Desenvolvimento, Indústria e Comércio (MDIC); Ministério de Minas e Energia (MME); Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

9 Formado por representantes de três instituições de pesquisa de diferentes regiões.

Os *roadmaps* tecnológicos mostram a evolução da maturidade dessas tecnologias, bem como as questões condicionantes para a sua evolução.

1.5. Conceitos das macrotemáticas

O grupo temático Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia contempla as fontes energéticas e as formas de geração de energia elétrica, além dos meios de armazenamento de energia no contexto da pesquisa, desenvolvimento e inovação. Inclui sistemas de geração e de armazenamento dedicados à geração em região remotas, além das tecnologias de planejamento, implantação, operação e manutenção de usinas.

As macrotemáticas relativas ao respectivo grupo temático estão conceituadas a seguir:

1.5.1. Energia eólica

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre o processo de conversão da energia cinética dos ventos em energia elétrica. Contempla as tecnologias de previsão e o planejamento da operação, implantação, manutenção e descomissionamento de parques eólicos, monitoramento e operação, além das tecnologias de equipamentos e os sistemas do parque gerador. As respectivas temáticas são caracterizadas de acordo com o porte (grande ou pequeno), o eixo e a localização (*on-shore* e *off-shore*) dos aerogeradores.

1.5.2. Energia nuclear

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre o processo de conversão da energia térmica, gerada a partir da fissão do urânio, em energia elétrica. Contempla os diferentes tipos tecnológicos dos reatores nucleares, combustíveis, materiais avançados e de alta pureza, segurança, operação, tratamento dos rejeitos nucleares, manutenção e descomissionamento de usinas nucleares. A geração de energia elétrica via fusão nuclear é mencionada como uma linha de desenvolvimento, apesar de toda a sua complexidade.



1.5.3. Soluções apropriadas para a geração de energia elétrica em regiões remotas

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre as tecnologias utilizadas na geração de energia elétrica em regiões remotas. As tecnologias consideradas neste estudo são soluções para a geração em sistemas isolados (tecnologias para a geração concentrada e para a geração descentralizada) e em sistemas conectados ao SIN (tecnologias para a geração de ponta de rede e para GD rural). A PD&I é abordada em cada um dos sistemas considerando as potencialidades energéticas das regiões remotas, as tecnologias que compõem os sistemas de geração e as tecnologias de gestão de ativos.

1.5.4. Armazenamento de energia

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre tecnologias de armazenamento de energia, com destaque aos tipos eletroquímicos (baterias), mecânicos, elétricos, químicos e térmicos. Também são consideradas na macrotemática as possibilidades de PD&I sobre as tecnologias de O&M dos sistemas de armazenamento, mais especificamente sobre os sistemas de gerenciamento de armazenamento de energia via baterias (BMS).

1.5.5. Geração hidroelétrica

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre a conversão da energia hidráulica em energia elétrica. Contempla as diferentes modalidades de usinas hidráulicas considerando o tipo do reservatório e a capacidade de produção de energia. São igualmente identificadas as diferentes tecnologias do conjunto turbina/gerador e as tecnologias de planejamento, operação e manutenção dos sistemas de conversão de energia.

1.5.6. Geração de energia elétrica via hidrogênio e ou célula a combustível

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre geração de eletricidade a partir do hidrogênio via célula a combustível. O uso da célula a combustível por meio do uso de outros insumos energéticos também foi considerado, porém com menor enfoque. Também são apresentadas as tecnologias de produção e de armazenamento do hidrogênio.

- Obs.: O uso do hidrogênio como insumo para a geração térmica não foi considerado em nenhuma macrotemática, por ser uma opção inviável e de difícil possibilidade de aplicação na geração de energia elétrica.

1.5.7. Termoeletricidade renovável e não renovável

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre os sistemas de conversão aplicados na geração termoelétrica (motores alternativos, ciclos a turbinas e sistemas de cogeração), tecnologias de O&M e geração de ativos, e as possibilidades de PD&I sobre o mapeamento dos potenciais energéticos, produção e o melhoramento de combustíveis (biomassa, resíduos sólidos urbanos e combustíveis fósseis).

- Obs.: Ressalte-se que, embora os sistemas de conversão heliotérmico e a geração nuclear utilizem máquinas térmicas em seus processos de produção de energia, essas tecnologias serão abordadas especificamente em outras macrotemáticas.

1.5.8. Energia dos oceanos

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre o processo de conversão dos diferentes recursos oceânicos em energia elétrica. Nesse estudo, são considerados como recursos oceânicos a energia das ondas, amplitude das marés, as correntes e as marés oceânicas, o gradiente de temperatura e o gradiente de salinidade.

- Obs.: São enfatizados os processos de conversão da energia das ondas e das marés.

1.5.9. Energia solar fotovoltaica

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre o processo de conversão da energia irradiada pelo sol em energia elétrica, por meio do efeito fotoelétrico. É composta por estudos sobre componentes dos sistemas fotovoltaicos (módulo de silício cristalino, módulo de filmes finos, módulo de tecnologias emergentes e sistema de monitoramento e operação - BoS), recurso solar e aplicação dos sistemas fotovoltaicos na GD, central fotovoltaica e em sistemas isolados.



1.5.10. Energia solar heliotérmica

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I sobre o processo de conversão da energia irradiada pelo sol em energia elétrica, por meio da concentração solar (*Concentrating Solar Power - CSP*) na geração de vapor. É composta por estudos sobre os sistemas CSP (sistema heliotérmico de linha focal, ponto focal e tecnologias auxiliares à geração heliotérmica - armazenamento de energia, GD, química solar e hibridização) e sobre o mapeamento do recurso solar.

1.6. Abordagem dos capítulos

Para cada uma das macrotemáticas apresentadas, é dedicado um capítulo, subdividido em quatro seções. Nestas seções, são definidos os objetivos que se buscam obter por meio do aporte da PD&I e o cenário geral prospectado para o horizonte considerado, além das métricas de evolução da macrotemática. A partir desse cenário, foi projetada a evolução da maturidade tecnológica de cada rota. Por fim, levando-se em consideração os objetivos, os cenários e a evolução das rotas, indica-se uma ordem de prioridade de investimentos e de recursos visando à maximização dos ganhos para o Setor Elétrico Brasileiro (SEB).

Inicialmente é apresentada a **visão geral da macrotemática** e o que ela aborda em termos de PD&I. Apresentam-se as temáticas, de acordo com o Mapa do Conhecimento (apresentado no Diagnóstico).

A seção **Visão de Futuro** apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos do desenvolvimento nacional de CT&I na macrotemática, considerando os horizontes de curto (2017-2020), médio (2020-2030) e longo prazos (2030-2050). Para tanto, é descrito inicialmente o cenário setorial da macrotemática, com as premissas baseadas no capítulo Visão de Futuro do Cenário Setorial (Livro - Documento executivo). Apresenta-se, ainda, uma fundamentação teórica da visão de futuro que contextualiza as informações apresentadas no cenário mais detalhado para a macrotemática.

A seção **Caracterização das métricas para o cenário futuro** busca representar o cenário geral de cada macrotemática, por meio de fatores que procuram explicar a evolução tecnológica da macrotemática no tempo: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I e indústria e mercado. Para cada macrotemática, foram definidas métricas referentes a diferentes dimensões de análise, conforme apresentado na Planilha de Indicadores (Anexo).

A seção **Estudo e prospecção das rotas tecnológicas** apresenta, por temática, os *roadmaps* tecnológicos de cada rota da macrotemática. Os *roadmaps* se caracterizam pelos gráficos de evolução da maturidade tecnológica de cada rota,¹⁰ associados aos seus fatores portadores de futuro.¹¹ Desta forma, tem-se uma ideia geral do que é necessário ser desenvolvido em termos de PD&I para que cada rota evolua ao longo do horizonte considerado no Projeto de *Prospecção Tecnológica no Setor de Energia Elétrica* (até 2050).

Por fim, a seção **Priorização das rotas** define a ordem de prioridade das rotas tecnológicas para o direcionamento dos investimentos e recursos. Tal ordem foi definida levando-se em consideração os objetivos da macrotemática, a sua ordem cronológica de desenvolvimento nos períodos de curto (2017-2020), médio (2020-2030) e longo prazos (2030-2050), o cenário setorial e a evolução do estágio de maturidade das rotas consideradas. Objetiva-se, dessa forma, definir o que é possível e o que se deve desenvolver de forma mais urgente, para que a macrotemática evolua como um todo e seus objetivos sejam atingidos. Ressalva-se que as rotas evoluem de forma concomitante.

1.7. Análise geral do grupo Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia (tendências internacionais e nacionais)

1.7.1. Tendência mundial das tecnologias de geração de energia elétrica e armazenamento de energia

No contexto mundial, a participação das fontes renováveis na geração de energia elétrica corresponde a 22,3% aproximadamente (ver Gráfico 1), característica observada nos países participantes da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e nos não participantes.

10 Para a compreensão do procedimento realizado para a formulação dos gráficos, ver Capítulo Metodologia.

11 Condicionantes para o desenvolvimento da rota tecnológica tal qual prospectado, os quais podem acelerar ou retardar a sua evolução.

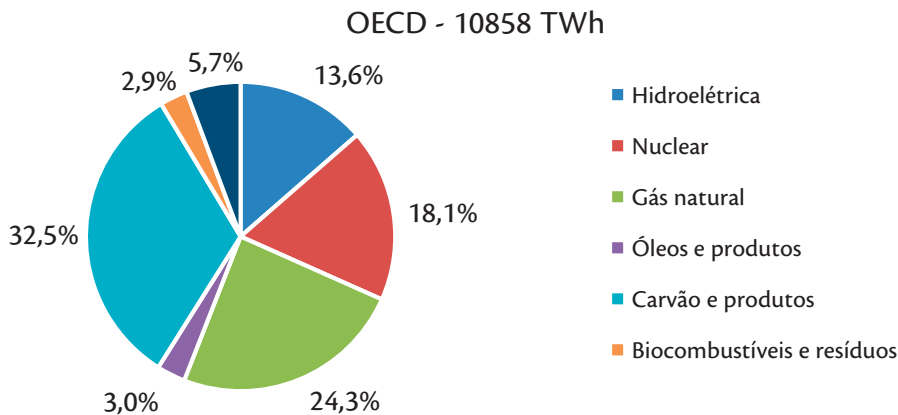


Gráfico 1 - Participação das fontes principais na produção de energia elétrica em 2015, nos países da OECD

Fonte: IEA (2015-a). Com base nos dados da AIE Energy Technology Perspectives 2015© OCDE / IEA 2015, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

Para 2050, a demanda de eletricidade projetada para o mundo considera um aumento de 73,2%, a contar de 2016, o que representará um montante de 32.737 TWh de energia média demandada (ver Gráfico 2). Neste contexto, a participação das respectivas fontes na geração de eletricidade será consideravelmente modificada (ver Gráfico 3 e Gráfico 4), com maior participação das fontes renováveis na geração, fato creditado às políticas de incentivo ao uso sustentável de insumos energéticos, à evolução da escassez de algumas fontes de energia (insumos fósseis) e ao desenvolvimento de novas tecnologias de conversão da energia renovável em energia elétrica.

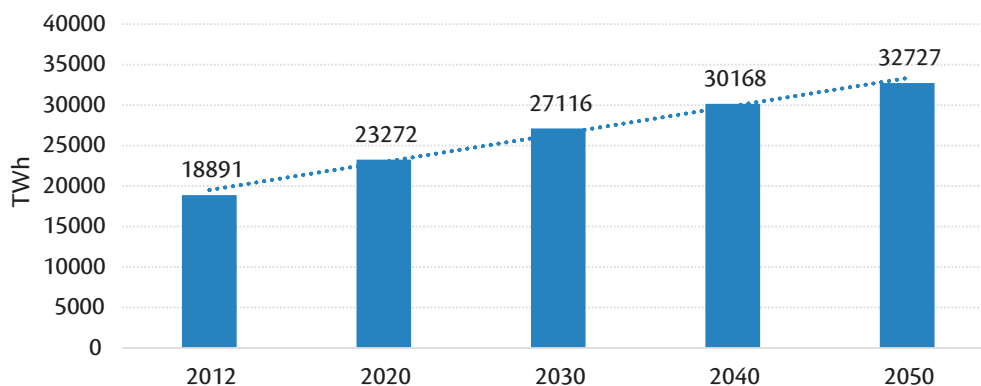


Gráfico 2 - Evolução da demanda de eletricidade no mundo

Fonte: OECD/IEA (2015-a). Com base nos dados da AIE Energy Technology Perspectives 2015© OCDE / IEA 2015, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

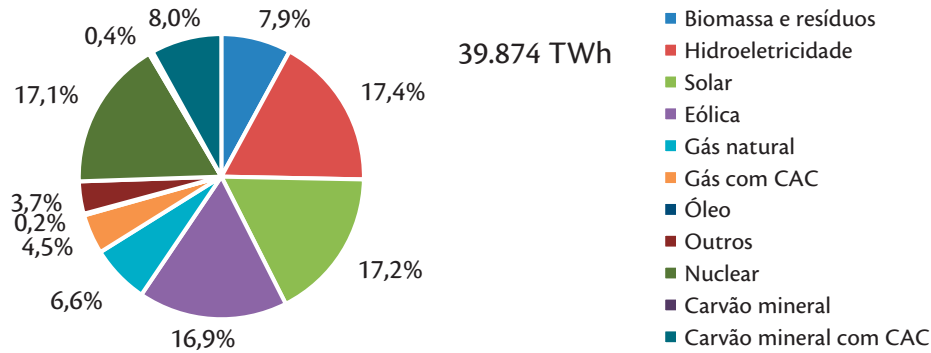


Gráfico 3 - Capacidade de geração global de energia elétrica por fonte projetada para 2050

Fonte: OECD/IEA (2015-a). Com base nos dados da AIE Energy Technology Perspectives 2015© OCDE / IEA 2015, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

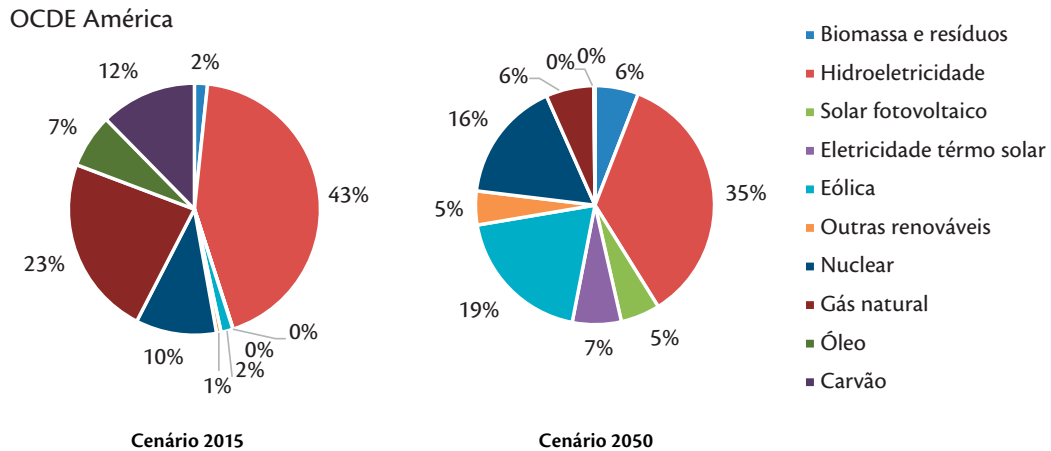


Gráfico 4 - Participação das fontes na capacidade de geração de energia elétrica nos países da OECD americanos em momentos

Fonte: OECD/IEA (2015-a). Com base nos dados da AIE Energy Technology Perspectives 2015© OCDE / IEA 2015, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

No cenário da geração de energia elétrica, as tecnologias de armazenamento de energia apresentam importância fundamental ao funcionamento do sistema elétrico de um país. O processo de armazenamento precisa ser capaz de acumular e de liberar energia em sincronia com o padrão



de fornecimento de eletricidade, além de preencher as lacunas ou a falta de energia em situações não previstas. Ou seja, o foco dessa tecnologia é garantir a despachabilidade da energia elétrica, considerando um *mix* de fontes de energia.¹²

Observa-se no cenário internacional uma projeção significativa da capacidade diária de armazenamento de energia (ver Gráfico 5). O fato reafirma a necessidade de políticas e de investimentos financeiros nessas tecnologias como forma de garantir um sistema elétrico equilibrado com a demanda e o consumo de eletricidade, além de adequado às questões inesperadas de déficit de energia (OECD/IEA, 2014-a).

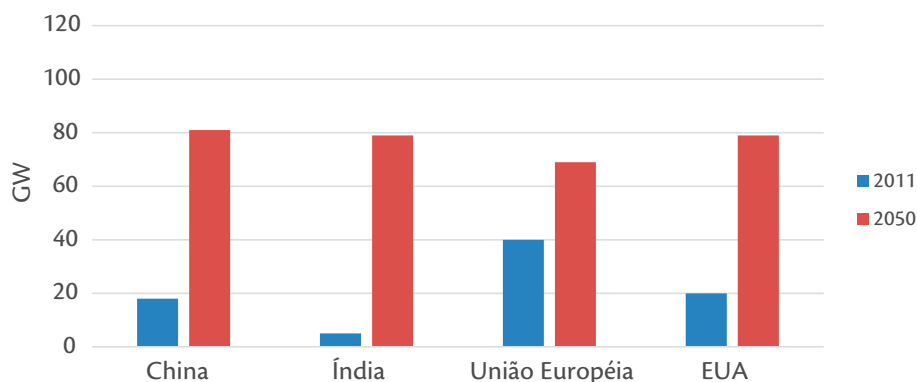


Gráfico 5 - Capacidade de armazenamento diário de eletricidade por região em 2011 e na projeção para 2050

Fonte: OECD/IEA (2014-a). Com base nos dados da AIE do Technology Roadmap Energy Storage © OCDE / IEA 2014, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Em meio a essa evolução da demanda e da oferta de energia elétrica no mundo, os investimentos em energias renováveis serão mais expressivos (ver Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3).¹³ Nas últimas décadas, as políticas de mitigação de emissão de carbono na geração da energia elétrica têm representado o maior impacto no mercado de eletricidade. Fato que, certamente, implicará as características do mercado futuro. À vista disso, muitos países têm reestruturado seus mercados de energia com foco nos próximos 30 ou 40 anos. Nessa reestruturação, é considerado o planejamento da evolução tecnológica dos sistemas de geração de energia elétrica e o armazenamento de energia, com foco na mitigação das emissões de carbono, conforme exigido em legislações locais.

¹² O mix de fontes engloba, principalmente, as fontes consideradas intermitentes, como eólica, oceânica e solar. Um dos papéis dos sistemas de armazenamento de energia é gerar despachabilidade da energia elétrica gerada por fontes intermitentes

¹³ As respectivas tabelas mostram a evolução dos investimentos em quatro cenários temporais e por região. Estão em destaque as fontes energéticas de maior impacto à matriz elétrica no contexto mundial, países da OECD e OECD América.

Tabela 1 - Cenário de investimento no mundo

	Investimento anual médio (em bilhões de dólares, referência ano 2012)				
	Histórico		Cenário - Mundo		
	2000-13	2014-20	2021-25	2026-30	2031-35
Combustível fóssil	106	120	117	117	125
Entre os quais: carvão	55	68	66	71	74
Entre os quais: gás	46	49	49	43	49
Nuclear	8	46	56	51	41
Renováveis	153	241	234	274	326
Entre as quais: bioenergia	17	22	23	34	39
Entre as quais: hidroeletricidade	52	71	65	69	68
Entre as quais: eólica	43	76	81	97	113
Entre as quais: solar fotovoltaica	37	60	49	51	71
Total	479	713	712	746	818

Fonte: OECD/IEA (2014-b). Com base nos dados da AIE do World Energy Investment Outlook Special Report © OCDE / IEA 2014, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Tabela 2 - Cenário de investimento OECD

	Investimento anual médio (em bilhões de dólares, referência ano 2012)				
	Histórico	Cenário - OECD			
	2000-13	2014-20	2021-25	2026-30	2031-35
Combustível fóssil	44	39	39	36	41
Entre os quais: carvão	12	14	15	19	20
Entre os quais: gás	30	25	24	16	20
Nuclear	4	17	18	20	16
Renováveis	87	110	110	132	150
Entre as quais: bioenergia	11	14	13	21	21
Entre as quais: hidroeletricidade	11	12	14	15	15
Entre as quais: eólica	29	41	49	59	57
Entre as quais: solar fotovoltaica	33	37	25	26	41
Total	236	274	261	282	304

Fonte: OECD/IEA (2014-b). Com base nos dados da AIE do World Energy Investment Outlook Special Report © OCDE / IEA 2014, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos



Tabela 3 - Cenário de investimento OECD Américas

	Investimento anual médio (em bilhões de dólares, referência ano 2012)				
	Histórico	Cenário - OECD Américas			
	2000-13	2014-20	2021-25	2026-30	2031-35
Combustível fóssil	21	18	17	22	23
Entre os quais: carvão	4	5	7	12	13
Entre os quais: gás	17	12	10	9	10
Nuclear	0	5	3	5	6
Renováveis	21	39	42	50	52
Entre as quais: bioenergia	2	9	7	7	7
Entre as quais: hidroeletricidade	4	4	6	6	6
Entre as quais: eólica	10	12	15	23	23
Entre as quais: solar fotovoltaica	4	10	11	10	12
Total	92	114	106	122	127

Fonte: OECD/IEA (2014-b). Com base nos dados da AIE do World Energy Investment Outlook Special Report © OCDE / IEA 2014, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Para sobreviverem às mutações nos mercados de energia, as empresas precisarão ser eficientes e adaptáveis às transformações da matriz elétrica dos países. Neste sentido, os respectivos investimentos precisam ser direcionados às tecnologias de geração de energia elétrica e ao armazenamento de energias mais promissoras.¹⁴

Armazenamento de energia

O panorama atual do uso das tecnologias de armazenamento de energia no mundo é apresentado no Gráfico 6. Neste cenário, ao menos 140 GW de capacidade de armazenamento diário estão disponíveis em sistemas conectados nas redes elétricas. Por volta de 99% dessa capacidade de armazenamento provém de usinas reversíveis (*Pumped Storage Hydropower -PSH*)¹⁵ e o 1% restante provém de baterias,

¹⁴ Promissoras no sentido de fornecer a energia elétrica demandada, considerando-se os baixos índices de particulados nas emissões e a custos comerciais competitivos.

¹⁵ São sistemas de armazenamento de água bombeada ao reservatório.

sistema de armazenamento de energia via ar comprimido (*Compressed Air Energy Storage - Caes*), volante de inércia e hidrogênio estocado.

A configuração do panorama 2050 para as tecnologias de armazenamento não é objeto deste documento. Porém, é factível observar que não deve haver mudanças extremas nessa configuração, no cenário pretendido. Fato atribuído à elevada confiabilidade,¹⁶ alta densidade de armazenamento de energia e custos operacionais competitivos dos sistemas PSH. Qualidades conferidas pela sua maturidade tecnológica (ver Gráfico 7). Por outro lado, as tecnologias em processo de desenvolvimento tendem a evoluir para a mesma maturidade tecnológica, elevando a sua capacidade de armazenamento de energia e operacionalidade (custos de fabricação e operação otimizados com a elevação da confiabilidade). Neste sentido, inúmeras pesquisas sobre os sistemas de armazenamento de energia têm sido realizadas.

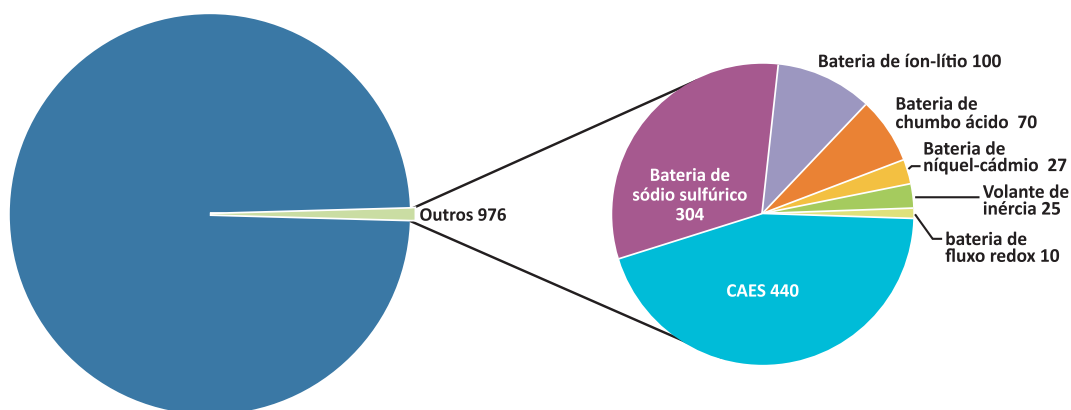


Gráfico 6 - Capacidade de armazenamento diário (GW) dos sistemas de armazenamento de energia conectados às redes elétricas (contexto, mundo)

Fonte: OECD/IEA (2014-c). Com base nos dados da AIE do Technology Roadmap – Energy Storage © OCDE / IEA 2014, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

¹⁶ Confiabilidade: variação da eficiência no tempo. Ou seja, quanto maior a confiabilidade, maior será a manutenção da eficiência ao longo da vida operacional de um determinado componente.

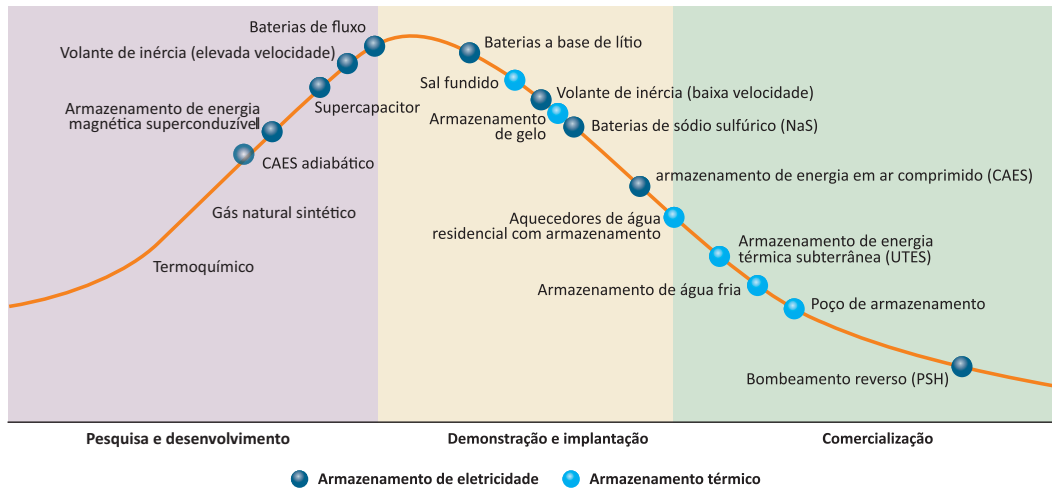


Gráfico 7 - Maturidade das tecnologias de armazenamento de energia, 2014

Fonte: OECD/IEA (2014-c). Com base nos dados da AIE do Technology Roadmap – Energy Storage © OCDE / IEA 2014, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Os sistemas de armazenamento de energia do tipo elétrico,¹⁷ químico,¹⁸ eletroquímico,¹⁹ térmico²⁰ e mecânico (neste caso, *Liquid Air Energy Storage* - Laes, Caes e volante de inércia) terão, portanto, aplicação mais expressiva na indústria, em GD e em regiões remotas. Os sistemas PHS terão ênfase na aplicação em redes de maior potência elétrica. Nas duas situações, as soluções avançadas de integração das fontes energéticas com os sistemas de armazenamento de energia terão elevada importância na operacionalidade do conjunto armazenamento/geração.

Energia eólica

Conforme apresentado no Gráfico 3 e Gráfico 4, a geração de energia elétrica via fonte eólica terá uma participação considerável na matriz elétrica mundial, entre 17% e 19%, no cenário 2050. Para alcançar esse horizonte, as tecnologias de aerogeradores têm evoluído em termos de tamanho de

17 Supercapacitores e supercondutores magnéticos.

18 Armazenamento de gás sintético.

19 Baterias.

20 Com e sem transformação de fase.

escala (ver Gráfico 8), novos desenhos e na eficiência da conversão da energia cinética transportada pelos ventos em energia de eixo.²¹

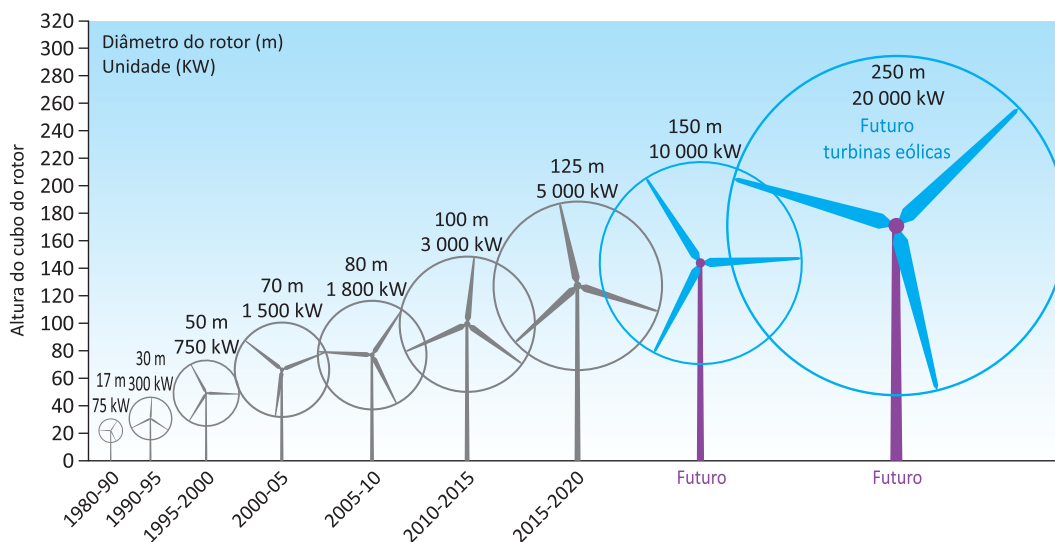


Gráfico 8 - Projeção do tamanho da escala dos aerogeradores

Fonte: OECD/IEA (2013-a). Com base nos dados da AIE do Technology Roadmap – Wind Energy © OCDE / IEA 2013, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

A meta para 2050 é alcançar tecnologias de turbinas eólicas com capacidade de geração de potência da ordem de 10.000 kW a 20.000 kW e, para tanto, serão necessários o cumprimento de algumas ações, dentre elas:

- Ações tecnológicas: garantir que componentes, ferramentas de O&M e monitoramento e nível de confiabilidade de sistemas evoluam concomitantemente às novas configurações de pás e rotores e aos novos materiais mais leves e resistentes, dentre outros;
- Caracterização do recurso eólico: mapear o recurso eólico e avaliar os locais de implantação de usinas eólicas. Esta ação depende do desenvolvimento de tecnologias metrológicas de precisão;

²¹ Energia de eixo ou torque gerado no eixo do rotor da turbina eólica, em função da transferência da energia cinética transportada pelos ventos ao rotor.



- Desenvolvimento da cadeia de suprimentos, manufatura, logística e implantação de parques eólicos: fomentar o desenvolvimento dos setores responsáveis por viabilizar a manufatura, o transporte e a montagem dos aerogeradores.

Outra importante questão para garantir a participação da energia eólica na matriz elétrica 2050 diz respeito à redução dos custos de fabricação dos componentes, ao desenvolvimento de tecnologias de integração das tecnologias de turbinas eólica com outras fontes de energia, com sistemas de armazenamento de energia e com a rede, à mitigação do ruído provocado pelas pás, à diminuição do impacto visual dos aerogeradores e a otimização dos sistemas O&M e do monitoramento. Em especial a essa tecnologia, haverá a participação da inteligência artificial no comando das ações de operação e de monitoramento, com capacidade para julgar as condições de operação dos sistemas, paradas, além de realizar os serviços de diagnósticos e, dependendo do caso, iniciar a autorreparação. O uso dessas tecnologias será possível com o desenvolvimento de sistemas metrológicos de elevada precisão.

No que diz respeito ao desenho dos futuros aerogeradores, a configuração das pás, do rotor e da torre propiciará melhor desempenho e estabilidade física ao equipamento. Estas características permitirão às turbinas operarem em regimes diferenciados de ventos e de clima e em aplicações variadas como em parques eólicos *on-shore* ou *off-shore*, em sistemas híbridos de geração de energia elétrica e na GD. A caracterização precisa do recurso eólico é fundamento ao desenvolvimento de desenhos mais aerodinâmicos e eficientes para o processo de conversão da energia. A aplicação de novos materiais com capacidade para suportarem elevado estresse mecânico e térmico e com propriedades anticorrosivas permitirá a construção desses componentes.

No contexto da geração *off-shore*, os aerogeradores terão DNA próprio. Ou seja, diferentemente dos aerogeradores atualmente implantados no oceano ou em lagos, os equipamentos²² que comporão as turbinas eólicas e os parques *off-shore* serão caracteristicamente projetados para as condições de operação em lagos e no mar. A exemplo disso, a Figura 1 apresenta a variabilidade dos sistemas de sustentação dos aerogeradores, configurados para diferentes situações de aplicações. Neste sentido, a caracterização das condições de ventos, marés, correntes d'água e salinidade precisa ter elevada precisão e confiabilidade. Considerados estes aspectos, será possível elevar o grau de diversificação dos aerogeradores com DNA *off-shore*, para atenderem à demanda por energia elétrica sob diversificadas situações de operação.

22 Sistemas de transmissão de potência elétrica e comunicação, sistemas de O&M e monitoramento, tecnologias de integração entre fontes e entre sistemas de armazenamento, plataformas flutuantes, sistema de ancoramento, dentre outros.

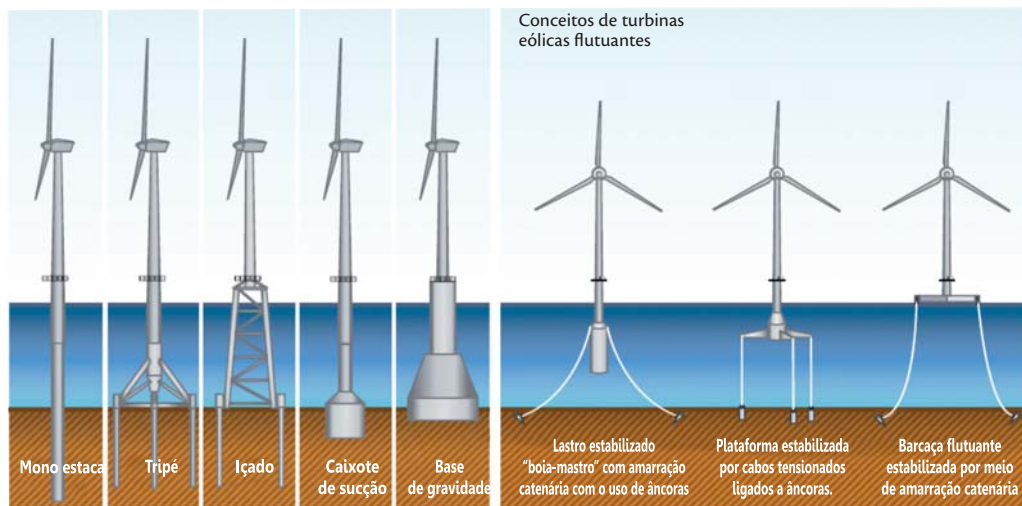


Figura 1 - Conceitos de sistemas de sustentação de aerogeradores com DNA off-shore

Fonte: OECD/IEA (2013-a). Com base nos dados da AIE do Technology Roadmap – Wind Energy © OCDE / IEA 2013, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Os desenhos de componentes, materiais e lubrificantes utilizados na caixa de transmissão de potência evoluirão para tecnologias que conferirão baixas perdas de energia por atrito entre engrenagens e um peso menor que o observado na transmissão convencional. Estas vantagens precisam vir acompanhadas de elevada confiabilidade e custos competitivos.

O gerador elétrico é outro componente passivo de evolução. Materiais de terras raras serão utilizados em geradores elétricos de elevada performance. Neste sentido, o mapeamento de terras raras e a mitigação dos custos de extração e de beneficiamento desse material tornarão a aplicação desses geradores elétricos factíveis.

Energia dos oceanos

O potencial estimado para a geração de energia elétrica via energia dos oceanos é da ordem de 20.000 TWh a 80.000 TWh. A natureza da energia proveniente desse meio diz respeito à energia presente nas ondas, na amplitude de marés e nas correntes oceânicas e de marés e à energia resultante dos efeitos do gradiente de salinidade e térmico. As tecnologias desenhadas para essas aplicações, na



sua maioria, estão na fase de demonstração, presentes em poucas usinas em operação na Europa, na América do Norte e na Sul.

Embora exista o interesse claro pela evolução das tecnologias de conversão de energia dos oceanos, algumas questões técnicas e estratégicas têm contribuído para que o uso dessas tecnologias ainda não esteja disseminado pelo mundo (OECD/IEA, 2013). A exemplo disso, podem ser destacadas:

- Questões estratégicas associadas ao não aproveitamento da energia dos oceanos:
 - portos, águas costeiras e mar aberto dedicados, a princípio, permanentemente às áreas de pesca e às rotas de navios;
 - falta de políticas e de medidas que sustentem o uso da tecnologia;
 - suporte financeiro;
 - incentivo de mercado;
 - falta de incentivo para a realização de projetos de P&D para o desenvolvimento da cadeia produtiva local;
 - falta de projetos conjuntos entre grupos, fabricantes, empresas, laboratórios desenvolvedores de tecnologias *off-shore*.
- Questões técnicas associadas ao não aproveitamento da energia dos oceanos:
 - sistemas capazes de mensurar e monitorar os efeitos no meio ambiente;
 - falta de uma rede de troca e de avaliação de informações sobre tecnologias;
 - plataformas avançadas de desenvolvimento e testes de tecnologias;
 - desenvolvimento de sistemas de O&M.

As tecnologias utilizadas no aproveitamento da energia das marés e das ondas possuem maior possibilidade de desenvolvimento, pois estão sendo trabalhadas há mais tempo. O nível de maturidade dessas tecnologias é operacional e estima-se que até a década de 2030 elas tenham a sua capacidade de produção de energia elétrica elevada (ORECCA (2011)). A partir dessa evolução, é esperado um potencial de geração de 188 GW, na Europa, e de 748 GW nas demais regiões empreendedoras, até 2050. As tecnologias de geração via gradiente de salinidade e temperatura devem alcançar maturidade tecnológica na década de 2040 e terão aplicações para demandas específicas.

Trazer as demais tecnologias de uso da energia dos oceanos para um estágio de maturidade é um desafio para a P&D, que precisa contar com a colaboração dos setores público e privado na promoção de políticas e de investimentos nessa área, desde as fases iniciais e de maturação até a implantação da infraestrutura de usinas. As respectivas tecnologias precisam, por outro lado, demonstrar a viabilidade (a partir das primeiras implantações) e a confiabilidade, além de confirmarem as tendências de redução dos seus custos, para se promoverem no cenário tecnológico (OECD/IEA, 2006).

Do ponto de vista técnico, é necessário observar o confronto existente entre os sistemas de energia do oceano e o ambiente marinho. Isso implica no desenvolvimento de dispositivos capazes de suportar variações climáticas, fortes ondas e correntes marinhas e, ao mesmo tempo, capazes de cumprir os requisitos econômicos e ambientais básicos, segurança na O&M, confiabilidade, simplicidade e baixo impacto ambiental (OECD/IEA, 2009-b).

Outra medida que pode aumentar a possibilidade do sucesso das tecnologias de oceanos é a intervenção dos governos via regimes regulatórios, no sentido de auxiliar o seu processo de desenvolvimento e implantação. Isso ajudaria a evitar barreiras técnicas e econômicas que podem atrasar o processo de desenvolvimento dessas tecnologias.

Geração de energia elétrica via hidrogênio e célula a combustível

O hidrogênio é considerado um vetor energético flexível que pode ser produzido a partir de qualquer fonte de energia primária (biomassa, por exemplo), prevalente de uma determinada região. Pode ser transformado em outras formas de energia para diferentes aplicações e é particularmente apropriado para o uso em célula a combustível para a geração de eletricidade. O uso do hidrogênio traz vantagens no que diz respeito à mitigação de emissões de particulados em áreas consideradas críticas em poluição. Pode ser armazenado e transportado por meio dos sistemas de logística atuais e utilizado junto a sistemas de cogeração e na geração híbrida (como a eólica e a solar fotovoltaica) para atender às demandas de regiões remotas e GD, por exemplo.

Embora a quantidade de hidrogênio utilizada em 2013 tenha alcançado a margem dos $7,2 \cdot 10^{18}$ J de energia equivalente, a maior parte desse montante, quase que a totalidade, foi usada como matéria-prima nas indústrias químicas e de refino em processos de transformação de materiais. Ou seja, o hidrogênio como insumo energético ainda é pouco aproveitado na cadeia de produção de energia elétrica, motriz ou na produção de energia na forma de calor.

O hidrogênio, em sua forma pura e individual, precisa ser gerado e os processos responsáveis por isso consomem energia, apresentam as mesmas ineficiências termodinâmicas e, por conseguinte, podem emitir espécies químicas poluentes. O uso do hidrogênio na geração de energia elétrica é, portanto, plausível a partir da sua produção por meio do aproveitamento energético oriundo de outros processos termodinâmicos.



A geração de energia elétrica via hidrogênio é possível por meio de duas formas: aplicação direta para a queima em ciclomotores alternativos ou por meio do uso de células a combustível. Considerando-se as características operacionais das células a combustível, torna-se evidente a sobreposição dessa tecnologia sobre os ciclomotores para a geração de energia elétrica.

Além dessa questão, o armazenamento do hidrogênio é outro importante ponto para garantir a viabilidade do seu uso na geração de energia elétrica. A molécula de hidrogênio é, particularmente, pequena ao ponto de o seu armazenamento exigir compartimentos projetados com materiais especiais (mínimo de permeabilidade).

Neste contexto, desenvolver ou aprimorar os meios de produção do hidrogênio, as células a combustível e os meios de armazenamento desse insumo são questões-chaves ao processo de viabilização do uso do hidrogênio na geração da energia elétrica. De uma forma geral, as pesquisas em torno dessas tecnologias focam a diminuição dos custos de produção e o aumento da eficiência operacional.

O nível de maturidade comercial das tecnologias citadas acima será alcançado, na sua maioria, em meados da década de 2025 e na década de 2030. O uso da geração de energia elétrica com célula a combustível via hidrogênio ocorrerá com maior ênfase nos sistemas de geração distribuída, de forma centralizada e como aporte às fontes intermitentes como a eólica e a solar fotovoltaica. No contexto de matriz elétrica, as primeiras aplicações na geração de eletricidade ocorrerão por meio de células a combustível do tipo óxido sólido, membrana polimérica e alcalina, dado o elevado nível de maturidade dessas tecnologias atualmente. A aplicação operacional de células do tipo metanol direto depende, em maior parte, do aumento da vida útil dos componentes dessa tecnologia e dos processos relacionados à operação e ao armazenamento do metanol. A tecnologia de células do tipo metano direto deve alcançar o nível de maturidade na década de 2030. A aplicação operacional das células a combustível do tipo carbonetos fundidos e do tipo ácido fosfórico depende, respectivamente, de tecnologias que ajudem a mitigar o processo de corrosão dos seus componentes e do desenvolvimento de tecnologias de purificação do hidrogênio para mitigar o CO. A maturidade operacional dessas tecnologias deve ocorrer na década de 2040.

As tecnologias de geração do hidrogênio do tipo eletrolisadores de óxido sólido, membrana polimérica e alcalino e gaseificação de reforma a vapor serão utilizadas em médio prazo (2020 a 2030). As tecnologias de geração do hidrogênio via processos biológicos, termoquímicos e fotoeletroquímico estarão em operação após esse prazo. No que diz respeito aos sistemas de armazenamento, o hidrogênio comprimido apresenta maior viabilidade a curto e a médio prazos. As tecnologias de armazenamento do hidrogênio líquido, armazenamento subterrâneo e sistemas de absorção física serão aplicadas no ciclo da geração de eletricidade de forma operacional de médio a longo prazos.

Termoelectricidade renovável e não renovável

A demanda mundial por eletricidade alcançará o patamar de 40.000 TWh em 2050. A participação das energias renováveis na geração de eletricidade aumentará de 19% para quase 60% em 2050, restando aos demais 40% a participação da fonte nuclear, além do carvão mineral, gás natural e de outras fontes não renováveis.

Apesar de a fonte biomassa em boa parte dos países ser complementar, no contexto da geração de energia elétrica, prevê-se uma capacidade de geração de 560 GW para 2050, dos quais, na produção de pelo menos 50 GW ocorrerá a captura de carbono por meio de novas tecnologias de armazenamento. Neste cenário, a bioenergia fornecerá aproximadamente 7,5% da geração de eletricidade no mundo, em comparação ao 1,5% de contribuição atual.

As tecnologias de turbinas a vapor apresentarão maior contribuição na geração de eletricidade via biomassa. Isso se deve à gama de escalas de operação na qual essa tecnologia se enquadra. Em contrapartida, algumas tecnologias de geração de eletricidade também terão visibilidade neste cenário. A saber:

- gaseificação (para biocombustíveis, ciclo combinado com gaseificação integrada);
- conversão biológica (para o etanol, biogás etc.);
- a digestão anaeróbia (por biogás);
- incineração de resíduos sólidos municipais (para a eletricidade e o calor);
- aplicações de processos de coqueima (para a geração de eletricidade e calor);
- pirólise rápida (*flash*) para a produção do bio-óleo;
- produção de bioetanol e biodiesel a partir de *lignocelulose*;
- produção de bio-hidrogênio;
- conversores que utilizam os gases processados (motores de alto rendimento e célula a combustível).

Tais sistemas proporcionarão melhor eficiência na produção de eletricidade a custos reduzidos.

A eficiência na geração de energia elétrica via bioenergia pode ser conseguida, entre outros, principalmente pela cogeração. Essa tecnologia terá maior evidência na utilização de sistemas de menores escalas, em que a eficiência de geração de eletricidade é baixa. A economia global nesses casos é determinada pela constância na disponibilidade de calor.



Não obstante, o uso de motores eficientes e de sistemas mais tecnológicos de cogeração contribuirão com os custos e com a produção de eletricidade. Neste sentido, o melhoramento de algumas tecnologias pode cooperar com o acréscimo de eficiência nos processos de geração.

A geração de energia elétrica via gás natural, carvão mineral, petróleo e respectivos derivados correspondem basicamente aos mesmos processos aplicados à geração de energia elétrica via biomassa, sendo eles: combustão direta, geração de vapor (*Rankine*), motores alternativos de combustão interna e turbinas a gás.

O carvão mineral abrirá duas possibilidades para a sua utilização no universo da energia elétrica que se resumem a: i) combustão direta (uso do carvão pulverizado, por exemplo); e ii) uso das suas formas intermediárias de energia: o gás de síntese e combustíveis líquidos.

Atualmente, boa parte das plantas de geração de eletricidade a carvão mineral apresenta baixo grau de eficiência térmica. Mais da metade das plantas possui a capacidade média de produção de 300 MW e está em operação há mais de 25 anos, e quase 3/4 das plantas usam tecnologia subcrítica para a geração de eletricidade.

Poucos países têm priorizado o desenvolvimento das plantas geradoras de eletricidade a carvão mineral. Apenas países como o Japão e a Coreia têm investido em tecnologias capazes de elevar a eficiência das suas termoelétricas acima de 40%. Além desses países, fazem parte do grupo a China e a Índia, por exemplo.

O número de plantas a carvão de elevada eficiência e baixa emissão de poluentes continua baixo no mundo. Em contrapartida, novas tecnologias de geradores de eletricidade a carvão têm surgido e são as apostas para o desenvolvimento de conversão mais limpa e eficiente, como as seguintes tecnologias:

- centrais termoelétricas ultrassupercrítica a carvão pulverizado;
- centrais termoelétricas ultrassupercrítica avançada a carvão pulverizado;
- combustão em leito fluidizado circulante;
- ciclo combinado de gaseificação integrada.

Embora se estime que essas tecnologias estejam maduras em 2050, para que isso de fato ocorra, trabalhos de P&D e o suporte de governos e de empresas serão fundamentais para o desenvolvimento dessas tecnologias.

Outro importante segmento de estudo na rota do carvão mineral são as tecnologias de conversão da matéria-prima em energéticos de segunda e terceira derivações, por exemplo. Investir no domínio de tecnologias-chaves que permitam diversificar o uso do carvão corresponde a um grande nicho de oportunidades para a melhoria da eficiência térmica e para a diminuição das emissões.

Entre as tecnologias mais promissoras são listadas a seguir aquelas que farão parte do ciclo da geração termoelétrica no horizonte até 2050:

- gaseificação em grande escala;
- gaseificação *in-situ* em grande escala;
- liquefação de carvão (processamento de carvão com extração por solventes);
- rota *Methanol to Olefins* (MTO);
- obtenção de dimetil éter por síntese direta;
- obtenção de dimetil éter por desidratação de metanol.

Entre as plantas de geração de energia elétrica, prevê-se que os ciclos termodinâmicos a gás possam suprir as demandas por eletricidade em períodos de pico de demanda (OECD/IEA, 2010-c).

Atualmente, o gás natural é uma fonte de energia abundante e é aplicada em sistemas de geração de eletricidade na indústria (múltiplos usos), em edificações (meio urbano) e, com participação menor, no setor de transporte. Do ponto de vista químico, a sua composição oferece vantagens no seu uso final em relação a outros tipos de insumos energéticos. O processo de queima do gás natural, por exemplo, é mais eficiente, dada a natureza de fácil difusão no oxidante e em outros insumos gasosos. Dessa forma é possível alcançar uma mistura homogênea e uniforme, sem pré-tratamento físico e químico, permitindo uma reação de queima completa do gás em condições estequiométricas - o que é uma vantagem como um meio de mitigar as emissões de CO, por exemplo. Em contrapartida, o gás natural possui energia de combustão específica menor que a dos outros combustíveis líquidos.

Outra vantagem da utilização do gás natural é a possibilidade de utilizá-lo em plantas de diferentes escalas, em resposta às flutuações das demandas por eletricidade (OECD/IEA, 2012-c).

Embora o uso do gás natural proporcione alta eficiência do processo de combustão, a busca pela eficiência termodinâmica dos conversores será sempre uma constante nas pesquisas sobre conversores térmicos de energia. Sob o ponto de vista prático do uso do gás natural, existem três meios de conseguir uma redução considerável no consumo desse insumo: i) pela substituição de plantas menos eficientes por outras mais tecnológicas, ou pelo aperfeiçoamento dessas plantas, incluindo novas tecnologias



de operação e manutenção; ii) pelo uso combinado do gás natural com insumos bioenergéticos; e iii) pela implantação de sistemas de captura e armazenamento de carbono.

Por certo, a escolha das tecnologias dependerá do nível de mitigação de CO₂ que se quer alcançar, considerando-se as questões de mercado (custo efetivo dos sistemas/produção de eletricidade/retorno financeiro).

Entre as tecnologias promissoras para a geração elétrica via gás, tendo em vista o horizonte de 2050, estão:

- Ciclo combinado de turbina a gás equipado com células a combustível: aproveitamento da alta temperatura rejeitada pelas turbinas para a operação das células a combustível de óxido sólido (sistema híbrido).
- Integração de um sistema de conversão solar a um ciclo combinado de turbina a gás: o calor gerado pelos concentradores solares é direcionado para aumentar o nível de entalpia do fluido de processo que será aplicado na turbina a vapor.
- Turbina a ar úmido: corresponde a um sistema regenerativo de turbinas a gás que utiliza o ar úmido como forma de aumentar a eficiência volumétrica do ar de processo aspirado. O método permite que o ciclo regenerativo tenha a mesma potência e eficiência do ciclo combinado de turbina a gás com o sistema de gaseificação do carvão.
- Sistema de captura de CO₂ acoplado aos ciclos combinados de turbinas a gás: os sistemas de captura e armazenamento são capazes de coletar aproximadamente 90% do CO₂ presente nos produtos da combustão, e transportá-lo por meio de gasodutos até o local de armazenamento, por exemplo, formações geológicas subterrâneas.

Geração hidroelétrica

A participação da fonte hidráulica corresponderá a 17% da capacidade de geração de energia elétrica, em âmbito mundial (Gráfico 3). O montante de energia elétrica gerada migrará dos atuais 4.000 TWh para um valor entre 6.000 TWh e 7.200 TWh, aproximadamente, dependendo da cenarização adotada (OECD/IEA (2012)).

Para sustentar esses cenários são necessárias medidas estratégicas que incluam a P&D como meio para mitigar questões ou barreiras ao desenvolvimento das tecnologias empenhadas na área.

Do ponto de vista técnico-evolutivo das turbinas hidráulicas, os maiores investimentos em P&D têm ocorrido no sentido de se obter equipamentos mais eficientes (a menor custo de produção) e sistemas e processos de O&M mais avançados, além de sistemas inovadores de TI, com foco no controle da produção de eletricidade (oferta/demanda otimizada).

Outras importantes temáticas de P&D se referem às tecnologias de repotenciação de usinas, de extensão da vida e da integração da tecnologia de geração hidráulica com outras fontes. No primeiro caso, os estudos estão voltados para a substituição de tecnologias consideradas ultrapassadas para o porte e as necessidades do empreendimento, além da identificação de melhores práticas de manutenção, avaliação de riscos, gestão de ativos e melhorias em sistemas de monitoramento. Além disso, para aportar a participação da energia hidráulica na matriz mundial, há a necessidade de tecnologias e métodos de caracterização e mapeamento das oportunidades e a inserção da fonte hidráulica. O estudo do recurso energético é fundamental à otimização operacional do empreendimento.

No caso das temáticas relativas à integração da hidroeletricidade com as demais fontes, destacam-se os estudos relacionados à interface entre sistemas hidráulicos e eólicos e hidráulicos e solares, além de sistemas híbridos voltados para a produção de hidrogênio, por exemplo.

As tecnologias mencionadas como temáticas de P&D devem alcançar o nível de maturidade operacional por volta da década de 2030, em sua maioria. A geração hidroelétrica ocorrerá em vários níveis de escala de máquinas, incluindo turbinas hidráulicas de baixas quedas e grandes vazões e principalmente turbinas com o conceito de hidrocínética, na qual é aproveitada a energia cinética das correntes d'água. A geração hidroelétrica de médio e pequeno porte será, na sua maioria, integrada a outras fontes de energia, principalmente à eólica e à solar. A geração de grande porte terá integração com fontes renováveis como a solar fotovoltaica e a hidrocínética (à saída do canal de fuga) para a geração complementar de energia de serviço da usina. Em meio à geração hidroelétrica, as usinas reversíveis integrarão o futuro das tecnologias associadas a essa fonte energética.

Energia solar fotovoltaica

No cenário 2050, a geração de energia fotovoltaica terá uma participação de 11% do total da energia elétrica gerada no mundo, será responsável por evitar 22 GtCO₂/ano de emissões e terá contribuído com aproximadamente 20% na redução de emissões poluentes, acumulada ao longo dos anos, até 2050. Atualmente, as tecnologias comerciais de células fotovoltaicas se dividem basicamente em dois tipos:



- Módulo de silício cristalino (c-Si), segmentado em duas principais categorias: i) cristalino simples (sc-Si); e ii) multicristalino (mc-Si); e
- Módulo de tecnologia de filmes finos, segmentado em três famílias principais: i) amorfo (a-Si) e silício micromorfo (a-Si/ μ c-Si); ii) telureto de cádmio (CdTe); e iii) disseleneto de índio e cobre (CIS) e disseleneto de gálio, índio e cobre (CIGS).

A maioria dos módulos fotovoltaicos disponíveis no mercado é feito à base de silício cristalino (> 85%). Embora seja tecnologia bem difundida no mercado, ainda há barreiras/obstáculos a serem ultrapassados, de forma a torná-la ainda mais viável do ponto de vista tecnológico e comercial.

A pesquisa aplicada aos sistemas fotovoltaicos é particularmente ampla em sua abordagem disciplinar e abrange a ciência de materiais, a física e a química dos dispositivos, eletrônica, robótica e tecnologias de construção (OECD/IEA, 2006). As pesquisas nesse segmento tratam, basicamente, da redução dos custos de fabricação e da implantação dos módulos fotovoltaicos e do ganho de eficiência energética.

Com relação aos novos materiais, são observadas pesquisas sobre o desenvolvimento de células orgânicas, células de óxido sensibilizadas por corantes, módulos fotovoltaicos do tipo multijunção e outros materiais nanoestruturados.

As células orgânicas são constituídas de materiais que possuem condutividade elétrica intermediária entre os condutores e os isolantes. Usualmente, os materiais empregados nas células fotovoltaicas comerciais são inorgânicos e feitos à base de gálio ou silício, conforme mencionado. Mais recentemente, uma classe de materiais tem emergido das pesquisas aplicadas e são baseados em componentes orgânicos capazes de combinar as propriedades de condutividade elétrica dos materiais tradicionais com as virtudes do plástico (moldabilidade). Desta forma, é possível obter dispositivos mais leves, flexíveis e que apresentam maior aproveitamento da energia solar.

As células de óxido sensibilizadas por corantes podem utilizar em sua fabricação o dióxido de titânio (TiO_2), o óxido de estanho (SnO_2) ou o óxido de zinco (ZnO_2), em substituição ao tradicional silício. Os óxidos apresentam baixo custo, se comparados aos materiais tradicionais, e, no caso do Brasil, o dióxido de titânio pode ser encontrado em reservas minerais.

A evolução tecnológica das células sensibilizadas por corante, sob o ponto de vista de diferentes áreas como a física, a química e a engenharia dos materiais, permitiu aumentar significativamente a eficiência desses dispositivos, em função da área ativa. Atualmente, a eficiência média das células de óxido pode variar de 9,9% a 11%, em um horizonte máximo de 15% registrados em alguns módulos

comerciais feitos de silício. Em pesquisas de escala laboratorial, a eficiência das células de óxido atingiu o patamar dos 12,3%.

Os módulos fotovoltaicos de multijunção são formados por múltiplas películas finas compostas por diferentes condutores. Esta configuração permite ao módulo absorver com maior eficiência a energia eletromagnética solar, já que os respectivos condutores possuem a função de absorver os diferentes níveis de radiação solar observados ao longo do dia. Neste caso, o objetivo da P&D é aumentar a capacidade de absorção de energia com base em diferentes configurações e materiais que compõem o módulo fotovoltaico (*National Renewable Energy Laboratory (2015)*).

Conforme mencionado, o uso dessas tecnologias no mercado dependerá dos custos de implantação e de operação dos módulos. Considerada um avanço nesta questão, é factível inferir que a aplicação de módulos do tipo multijunção, silício cristalino e filmes finos será a responsável por uma parcela significativa da energia gerada via sistemas fotovoltaicos, no horizonte 2050.

A tecnologia de módulos fotovoltaicos, além de cumprir com a eficiência e a confiabilidade esperadas, terá maiores moldabilidade e modularidade. Fatores importantes para a implantação dessa tecnologia em qualquer contexto nas matrizes elétricas do mundo (sistemas isolados, GD, centrais fotovoltaicas, sistemas híbridos, dentre outros).

Para o uso da tecnologia fotovoltaica, a tecnologia de inversores também precisa adquirir um elevado nível de maturidade, em paralelo aos módulos promissores. Os inversores têm a função de converter a corrente contínua (CC) gerada pelos módulos em corrente alternada (CA) a ser disponibilizada para a rede. Os equipamentos são fabricados em diferentes configurações para atender às demandas de aplicabilidade como o tipo de conexão com a rede e o porte do módulo. Por isso, a P&D tem como foco diminuir as perdas energéticas observadas no processo de conversão da corrente contínua para a corrente alternada, além de permitir uma variabilidade maior do uso desses módulos em sistemas mais sofisticados de células fotovoltaicas.

Considerando-se os aspectos abordados neste texto, a tecnologia de geração fotovoltaica deve alcançar a sua maturidade na década de 2030 e, conforme mencionado, essa fonte terá aplicação fundamental em todos os segmentos das matrizes elétricas no mundo.



Energia solar heliotérmica

Estima-se que em 2050 as tecnologias de concentração solar sejam responsáveis por 11% da capacidade de geração de energia elétrica (é considerado aqui um cenário de zero emissão de carbono - hi-Ren) e pela redução de 2,1 GtCO₂/ano. Até esse ano, o uso da geração heliotérmica de energia terá evitado 9% das emissões poluentes, em contexto mundial.

As tecnologias de concentradores solares comercialmente utilizadas nos sítios de geração de eletricidade são divididas em quatro categorias:

- Pratos parabólicos:
 - prato parabólico (ponto focal e receptor móvel para a concentração de radiação);
- Calha cilíndrico parabólica:
 - sistema parabólico tipo calha (foco em linha e receptor móvel, para a concentração de radiação);
 - dispositivo refletor tipo *Scheffler* (parabólico tipo calha, ou prato, com recepção fixa, para a concentração de radiação);
- Refletores lineares Fresnel (foco em linha e receptor fixo para a concentração de radiação);
- Torres solares (ponto focal e receptor fixo para a concentração de radiação);
- Coletor solar (placas solares de uso residencial, por exemplo, sem concentração de radiação).

Com exceção dos pratos parabólicos, as demais tecnologias de concentradores solares podem fornecer eletricidade firme e despachável graças à integração da energia térmica, gerada e estocada em fluidos de trabalho, com os sistemas termodinâmicos capazes de extrair e transformar a tal energia em eletricidade (sistema híbrido).

Esses sistemas (solar-eletricidade) apresentam eficiências por volta de 10% (refletores lineares Fresnel), 15% (calhas) e 30% (pratos). As eficiências obtidas via torres solares variam de 15% a 20%, mas estima-se que no futuro esse patamar seja de 25% a 30%, com o uso do ciclo *Rankine*; e de 35%, com o uso do ciclo *Brayton* e de outros ciclos combinados (OECD/IEA, 2009-b).

Atualmente, está em desenvolvimento a aplicação de sistemas termossolares que conciliam as elevadas temperaturas geradas por esses dispositivos com combustíveis fósseis, ou água, como fluido transportador de calor, para a produção de hidrogênio. Os sistemas oferecerão oportunidades para aumentar a fração solar do mix global de energia, além da geração de energia elétrica. Será possível, entretanto, integrar o hidrogênio produzido nesses sistemas em redes de gás e em redes de fabricação

de combustíveis líquidos e de outros vetores de energia (OECD/IEA, 2009-b). Neste contexto, as pesquisas têm dado ênfase ao aumento da eficiência dos sistemas de concentração solar (obtenção de temperaturas mais elevadas) e à redução dos custos de implantação e uso dessas tecnologias.

Além disso, as novas estruturas tecnológicas cumprirão com requisitos como menor peso e maior rigidez, e possuirão sistemas de rastreamento mais precisos, permitindo uma montagem simplificada.

As necessidades de evolução e de desenvolvimento dos sistemas de armazenamento de energia estão estritamente ligadas à factibilidade da aplicação dos sistemas heliotérmicos de geração. Um desafio específico consiste, portanto, no desenvolvimento de sistemas de armazenamento de vapor seco de alta pressão e temperatura, fato decisivo na redução dos custos da produção de eletricidade.

A participação da geração heliotérmica no mercado de energia também depende do aumento da eficiência dos ciclos termodinâmicos empregados nos sistemas geradores de eletricidade. Esse aumento da eficiência térmica, integrado à diminuição dos custos de O&M e de implantação, caracteriza um fator relevante para a garantia de redução dos custos de investimento em uma unidade (usina) e a consequente disseminação dessa tecnologia no mercado de energia (OECD/IEA, 2009-b).

Energia nuclear

Atualmente, essa tecnologia é utilizada em boa parte dos países europeus, na América do Norte e na Ásia, por exemplo. A participação da geração nuclear em 2012, segundo publicação OECD/IEA (2015), alcançou o patamar de 7,5% na produção de eletricidade no mundo, equivalendo a aproximadamente 3.000 TWh de energia elétrica naquele ano.

As tecnologias atuais de usinas nucleares são usualmente categorizadas de acordo com o tipo de fluido de arrefecimento dos reatores e/ou de acordo com o tipo de moderador da atividade atômica utilizado (OECD/NEA, 2012). Por volta de 80% dos reatores comerciais em operação em 2010 eram refrigerados por meio de água comum. A tecnologia é conhecida como Reator de Água Leve (LWR). Além dessa tecnologia, existem mais dois tipos de reatores, amplamente utilizados no setor energético: i) Reator de Água Pressurizada (PWR); e ii) Reator de Água Fervente (BWR). A maioria desses reatores é refrigerada por meio do uso de água pesada (água com elevada quantidade de isótopo deutério de hidrogênio) ou de gás.



Além dessas tecnologias, ainda estão em uso os reatores do tipo: i) arrefecido via gás (GCR); ii) reator de água pesada pressurizada (ou Candu - tipo canadense); iii) reator refrigerado a água leve, com moderador tipo grafite (RBMKS, sigla russa); e iv) reator rápido.

Embora boa parte das plantas nucleares projetadas e construídas nas décadas de 1970 e 1980 esteja chegando ao final da sua vida operativa, muitos dos seus componentes e sistemas podem ser trocados a fim de garantir sobrevida a essas instalações. Os reatores que passam por esse processo são conhecidos como reatores do tipo *lifetime* (tempo de vida). Os equipamentos repotencializados mais comuns nesse segmento de geração correspondem aos tipos PWR e BWR.

Após o acidente ocorrido na usina nuclear de Fukushima, a maioria dos países cuja matriz elétrica inclui a fonte nuclear avaliou a segurança das respectivas usinas. Contudo, nem todas as respostas foram obtidas, já que as reais causas do acidente ocorrido no Japão ainda não foram divulgadas (OECD/IEA, 2015). Em razão desse fato, o crescimento esperado da participação da energia nuclear para o período de 2013 a 2030 foi reduzido, no pior cenário, para 23 GW de potência instalada e, no cenário mais otimista, para 34 GW.

Entre os efeitos gerados pelo acidente incluem-se alguns fechamentos prematuros de usinas nucleares, atrasos ou cancelamentos de novos empreendimentos, além do aumento dos custos de implantação provocados pelos novos regulamentos técnicos e protecionistas impostos pelas agências reguladoras. As incertezas políticas e econômicas também têm reduzido a expectativa de projeção da expansão da energia nuclear.

Aliados a esses fatores, o baixo preço do gás natural e as crescentes políticas de incentivo ao uso das fontes de energias renováveis têm provocado impactos sobre as perspectivas de crescimento do uso da energia nuclear em algumas regiões do mundo desenvolvido. A crise financeira estagnada na economia global também trouxe novos desafios para os projetos de investimentos em energia nuclear.

Por outro lado, é esperado um crescimento populacional e uma demanda de energia elétrica consideráveis, em escala global, para os próximos 30 anos. As preocupações com as alterações climáticas, qualidade do ar, segurança no abastecimento de eletricidade e com a ininterrupta volatilidade dos preços dos combustíveis podem indicar forte tendência para a utilização da fonte nuclear como um dos principais meios de produção de energia elétrica no mundo.

Considerando-se este contexto, estima-se que a participação da energia nuclear na geração global de eletricidade será de 17% na matriz elétrica em 2050. A geração nuclear estará presente em boa parte dos continentes e em países como a Finlândia, a Rússia e a África do Sul essa tecnologia será responsável

por 20% da produção de energia elétrica. Países como a Coreia e aqueles pertencentes ao leste europeu terão em suas matrizes elétricas de 55% a 60% da energia elétrica gerada via fonte nuclear. A energia nuclear será responsável pela redução de 2,5 *GtCO₂/ano*, na descarbonização do setor elétrico.

Para alcançar os respectivos percentuais, serão necessárias algumas evoluções nessa tecnologia, como:

- otimização das tecnologias de terceira geração com foco no aumento da performance, segurança e custos do desenvolvimento e da operação e manutenção das plantas;
- aceleração do desenvolvimento dos protótipos dos pequenos reatores modulares, objetivando demonstrar os benefícios do uso dessa tecnologia;
- desenvolvimento dos reatores de quarta geração (*Fast Breeder Reactor*), mais eficientes;
- desenvolvimento das plantas de quarta geração do tipo Foak;
- aprimoramento dos processos de extração do urânio de forma sustentável para atender a uma demanda de longo prazo;
- desenvolvimento de novas técnicas de segurança para o uso dos reatores existentes;
- desenvolvimento da geração de energia por meio da fusão nuclear.

Em vista dessas questões, o futuro tecnológico da geração nuclear será fundamentado nas tecnologias de terceira e quarta gerações (ver Figura 2). As próximas décadas serão dominadas por reatores avançados de Geração III (na faixa de 1.000-1.700 MW), do tipo PWR ou BWR. Alguma implantação de reatores de pequeno e médio porte (SMR), reatores a água pesada pressurizada (PHWRs) e reatores de Geração IV.

Os benefícios do ciclo do tório ainda não foram demonstrados ou fundamentados, particularmente em um ambiente comercial ou regulatório. A infraestrutura de apoio teria de ser estabelecida a partir do zero.

No que diz respeito aos Reatores Geração IV, as tecnologias mais propensas a serem demonstradas como protótipos são: reator rápido, refrigerado a sódio (*Sodium-cooled Fast Reactor - SFR*); rápido, refrigerado com chumbo (*Lead-cooled Fast Reactor - LRF*); e reator refrigerado a água supercrítica (*Very High Temperature Reactor - VHTR*). Protótipos 2030 – *feedback* operacional 2040 - Foak 2050 ou além.

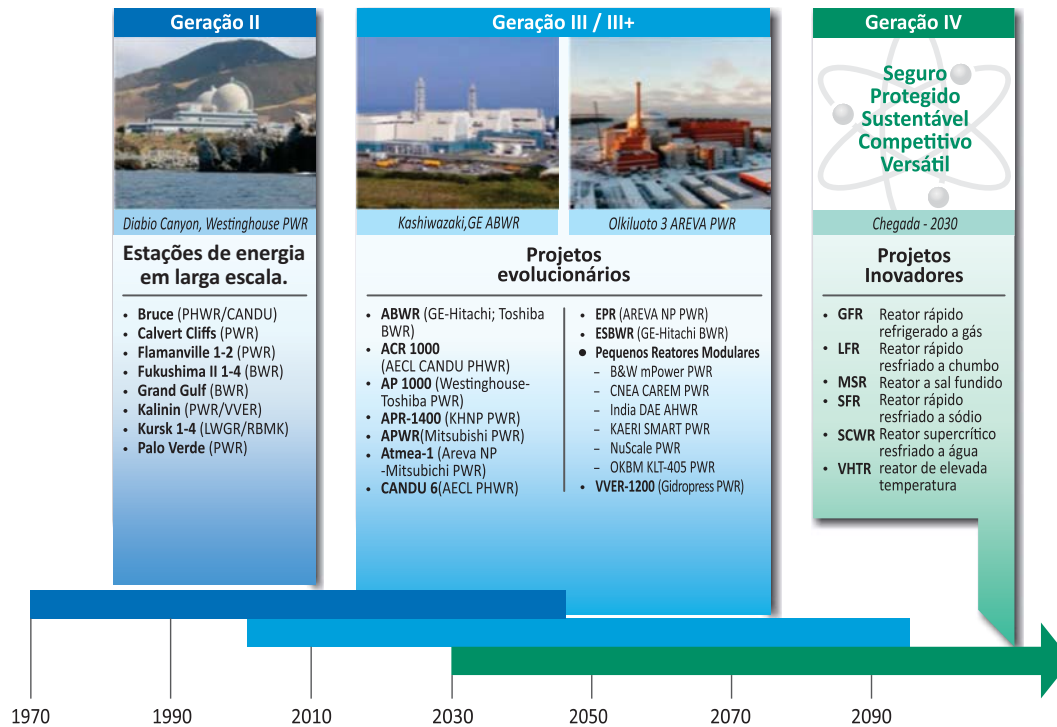


Figura 2 - Roadmap energia nuclear (fissão)

Fonte: OECD/IEA (2015). Com base nos dados da AIE do Technology Roadmap – Nuclear Energy © OCDE / IEA 2015, www.iea.org/statistics. Licença: www.iea.org/t&c; conforme modificado (traduzido) pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Sobre as tecnologias de geração de eletricidade via fusão nuclear, nenhum reator de fusão industrial está previsto para antes da segunda metade do século XXI.

Soluções apropriadas para a geração de energia elétrica em regiões remotas

As soluções apropriadas dizem respeito à melhor aplicação de sistemas de geração de energia elétrica para regiões sem atendimento da rede ou com atendimento incipiente de um sistema interligado. Para a identificação das melhores tecnologias que atendam a essas regiões são necessários estudos e técnicas para a caracterização e o mapeamento das fontes energéticas, identificação de capacidades

para a gestão do empreendimento,²³ e caracterização do melhor arranjo entre sistemas de conversão de energia para garantir a geração de eletricidade por demanda e com qualidade.

Sob o ponto de vista tecnológico, são necessários para o funcionamento de um sistema apropriado: tecnologias avançadas de integração de fontes com os sistemas de armazenamento, tecnologias de gestão de ativos (O&M, monitoramento e comunicação), sistemas de geração de energia elétrica com disposição para modularidade (potenciais de geração adequados para a formação de sistemas híbridos), além do desenvolvimento de sistemas práticos de beneficiamento de insumos energéticos locais.

Considerando-se este contexto, pode-se inferir que o futuro das tecnologias de geração para essas regiões é fundamentado, em sua maioria, no desenvolvimento de sistemas de integração das fontes solar-fotovoltaica-PCH e/ou hidrocínética-térmica (biomassa) - eólica-heliotérmica-sistemas de armazenamento de energia-cogeração-rede e no desenvolvimento dos próprios sistemas de conversão. A pesquisa, neste contexto, é direcionada à operacionalização viável dessas tecnologias, à confiabilidade e à melhoria da eficiência dos conversores de energia, em configuração híbrida ou não.

A eficiência na geração da energia elétrica será, portanto, uma função da somatória das eficiências dos conversores de energia e da dinâmica da interação desses conversores com os sistemas de armazenamento.

A garantia da despachabilidade de energia elétrica também passa por um plano e por técnicas de operação e de manutenção coerentes, fundamentados em tecnologias de ponta e acessíveis, do ponto de vista de entendimento da tecnologia, aos operadores locais.

Essas tecnologias devem ser melhor exploradas em regiões presentes na América do Norte e do Sul e em países como a China e a Rússia, dadas as suas configurações geográficas e pela variabilidade da disponibilidade dos recursos energéticos. O que não quer dizer que a natureza dos sistemas apropriados não deva estar presente nos demais países.

1.7.2. Contexto Brasil das tendências das tecnologias de geração de energia elétrica e armazenamento de energia

O aumento da capacidade instalada para a geração deve ser de pelo menos três vezes a capacidade de geração atual (PCE Brasil 2050). A matriz apresentará uma participação elevada de fontes

²³ Sistemas de geração de energia elétrica.



intermitentes na matriz elétrica nacional. A fonte hidráulica continuará sendo a vocação nacional para a geração de energia elétrica. Estes cenários exigirão, portanto, não só tecnologias de operação do sistema avançadas, como também tecnologias de integração entre fontes e entre os sistemas de armazenamento de energia.

No que diz respeito à evolução tecnológica das fontes, em particular a fonte hidráulica, serão implantadas novas tecnologias de turbinas hidráulicas dedicadas às usinas de baixa queda e às usinas reversíveis, turbinas de elevada eficiência para a geração hidrocínética, novas tecnologias de O&M e monitoramento, turbinas repotenciadas e mais eficientes, além de novas tecnologias que ajudem a mitigar os efeitos da interação usina/meio ambiente.

Sobre a energia eólica, as tecnologias a serem implementadas terão DNA nacional, variando de pequeno a médio porte, com novas tecnologias e mais eficientes. O país deterá sistemas dedicados à previsibilidade da fonte, de elevada tecnologia e precisão.

A geração solar contará com sistemas fotovoltaicos, modularizados para a GD e para usinas de geração solar, com tecnologias de painéis mais eficientes e sistemas BoS de tecnologia nacional. A geração heliotérmica terá maior ênfase como sistema de aquecimento (foco em eficiência energética e cogeração). A geração de energia elétrica deve ocorrer de forma complementar às demais fontes, em sistemas como a GD e em regiões remotas (sistemas híbridos), e terá papel importante no segmento da química solar, na produção de combustíveis.

Na geração termoeétrica, as tecnologias aplicadas à matriz dizem respeito às tecnologias de elevada eficiência e baixa emissão de poluentes para o uso do gás natural, biomassa, carvão e resíduos sólidos urbanos (RSU). Serão tecnologias dedicadas à geração centralizada e à GD. A biomassa e o RSU terão sistemas de beneficiamento nacionais e servirão de insumo para novos combustíveis. A geração termoeétrica também contará com avançado sistema de gestão que permitirá a otimização ou a flexibilidade operativa dos sistemas de geração termoeétrica.

O uso dos recursos oceânicos ocorrerá por meio de tecnologias nacionais de geração via energia das ondas (coluna d'água oscilante e corpo oscilante) e via energia das marés (amplitude e corrente de maré).

A geração nuclear ocorrerá por meio de reatores de geração II e de geração III, de variados portes, com o uso de elementos combustíveis fabricados no Brasil.

A geração via célula a combustível ocorrerá principalmente na GD, por meio do hidrogênio renovável e de baixo custo, gerado a partir do biogás e via processos de eletrólise de tecnologia nacional.

As tecnologias de geração elétrica via fonte solar (fotovoltaica e heliotérmica), eólica, hidráulica e biomassa, em sua maioria, compõem às soluções apropriadas para regiões remotas. O Brasil deterá a tecnologia para essas soluções, incluindo sistemas de integração dos conversores de energia, sistemas de armazenamento e a rede, onde houver.

Os sistemas de armazenamento de energia terão participação na matriz elétrica nacional, principalmente, por meio de usinas reversíveis e em menor escala via baterias, para aplicação em sistemas GD, na sua maioria.

As respectivas tendências tecnológicas são abordadas de forma plena ao longo desse trabalho.



Capítulo 2



Capítulo 2

Metodologia da etapa construção do futuro

2.1. Processo de construção do futuro

O processo para a realização da etapa “construção de futuro” tem início na primeira subetapa, definindo um cenário geral e, com base nele, as visões de futuro de cada macrotemática e seu detalhamento. A subetapa “seleção”, respaldada nas visões de futuro, identifica os fatores específicos, ou os objetivos de curto, médio e longo prazos e sua fundamentação. Ao mesmo tempo, inicia o processo de construção da trajetória de evolução da maturidade tecnológica de cada rota das macrotemáticas. Por fim, com base nas visões de futuro e nas trajetórias traçadas, são identificadas as rotas prioritárias. A última subetapa da “construção de futuro” consolida as trajetórias com a construção dos *roadmaps*, passando a incluir as informações sobre os principais fatores portadores de futuro e sua evolução no tempo.

Esse processo é melhor detalhado na Figura 3, que faz uma reclassificação conforme as subetapas apresentadas anteriormente. Cada atividade é detalhada na sequência.

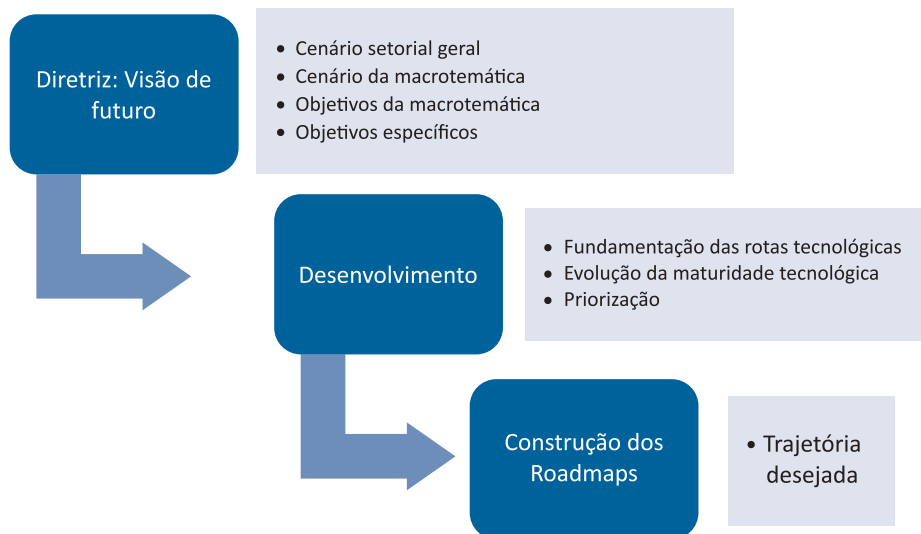


Figura 3 - Processo da etapa de construção de futuro

Fonte: Elaboração própria.

2.2. Diretrizes: Visão de futuro

A visão de futuro caracteriza o cenário setorial e o que se espera do resultado do investimento em P&D em cada macrotemática, em 2050, e tem por objetivo dar a diretriz para o desenvolvimento do *roadmap* tecnológico e para as ações de CT&I. A construção da visão de futuro inicia-se com a definição de um cenário setorial seguido por um conjunto de diretrizes construídas para cada macrotemática.

2.2.1. Cenário setorial geral

O termo cenário foi introduzido no planejamento e na tomada de decisões por Herman Kahn em conexão com estudos militares e estratégicos realizados pela Corporação Rand na década de 1950. Pode ser definido como um retrato rico e detalhado de um mundo futuro plausível, suficientemente vívido para que um planejador possa ver e compreender claramente os problemas, os desafios e as oportunidades que esse ambiente apresentaria. Um cenário não é uma previsão específica do futuro, mas uma descrição plausível do que pode acontecer.



Um cenário representa uma descrição de uma situação futura e do conjunto de eventos que permitem que se passe da situação original para a situação futura. Apesar de considerar os múltiplos cenários, a descrição de um futuro potencial e a progressão em direção a ele representam um cenário (GODET; ROUBELAT, 1996).

Na etapa de construção de futuro, o conceito de cenários foi utilizado para idealizar um futuro desejado. É apresentado um cenário geral sobre o futuro do setor, considerando-se a visão vislumbrada pelo planejamento do setor elétrico no horizonte até 2050. É um cenário único para todo o projeto e orienta todo o trabalho de construção do futuro. Foi elaborado por um grupo de especialistas representantes das instituições que compõem a governança do setor²⁴ e por outros especialistas de visão geral do setor, que formam os comitês estratégico e consultivo do projeto, respectivamente.

Os cenários utilizados para idealizar o futuro desejado das macrotemáticas dos grupos temáticos estão no livro Documento executivo.

2.2.2. Visão de futuro específica para cada macrotemática

Com base no cenário setorial geral constituído, foram construídas algumas diretrizes para cada macrotemática, compostas de três partes:

- **Cenário da macrotemática:** apresenta a visão de futuro do setor, com base no cenário setorial, no contexto da macrotemática. Aborda aspectos como mercado, previsão de demanda, alterações na matriz energética e demais aspectos globais que influenciarão o cenário tecnológico da macrotemática, no horizonte até 2050. Este cenário, construído para cada macrotemática, subsidia o objetivo geral.
- **Objetivo geral:** apresentada o objetivo do investimento em PD&I na macrotemática, sob o aspecto tecnológico. Ou seja, apresenta as tecnologias (ou os conhecimentos) que precisam estar desenvolvidas no âmbito da macrotemática até 2050.
- **Objetivos específicos:** apresenta o desenvolvimento tecnológico necessário para alcançar o objetivo geral da macrotemática, nos horizontes específicos de curto, médio e longo prazos, também considerando-se o aporte da PD&I. Ver Figura 4.

²⁴ Ministério de Minas e Energia (MME); Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC), Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) e Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel).

Curto prazo (2017 - 2020)	Médio prazo (2020 - 2030)	Longo prazo (2030 - 2050)
<ul style="list-style-type: none">objetivos específicos com prioridade de curto prazo para o desenvolvimento do objetivo geral	<ul style="list-style-type: none">objetivos específicos com prioridade de médio prazo para o desenvolvimento do objetivo geral	<ul style="list-style-type: none">objetivos específicos com prioridade de longo prazo para o desenvolvimento do objetivo geral

Figura 4 - Objetivos específicos por horizonte de análise

Fonte: Elaboração própria.

Estas diretrizes foram construídas juntamente com pesquisadores especialistas de cada macrotemática.

2.3. Desenvolvimento

Esta fase tem o objetivo de detalhar e analisar as rotas tecnológicas (ou de conhecimento) que compõem cada macrotemática. Para isto, são construídas, ou ajustadas, e fundamentadas as seguintes partes: mapa do conhecimento; evolução da maturidade tecnológica; e priorização.

2.3.1. Mapa do conhecimento

O mapa do conhecimento tem como objetivo principal identificar as linhas de pesquisa e as informações adicionais sobre elas. Construído de maneira estruturada, seguindo a condicionante inicial do projeto, divide a área de energia elétrica em cinco grupos temáticos. Depois, cada grupo é dividido em macrotemáticas, estas em temáticas e na sequência em rotas tecnológicas (ou do conhecimento). E, finalmente, é feita a classificação das linhas, conforme apresentado na Figura 5.

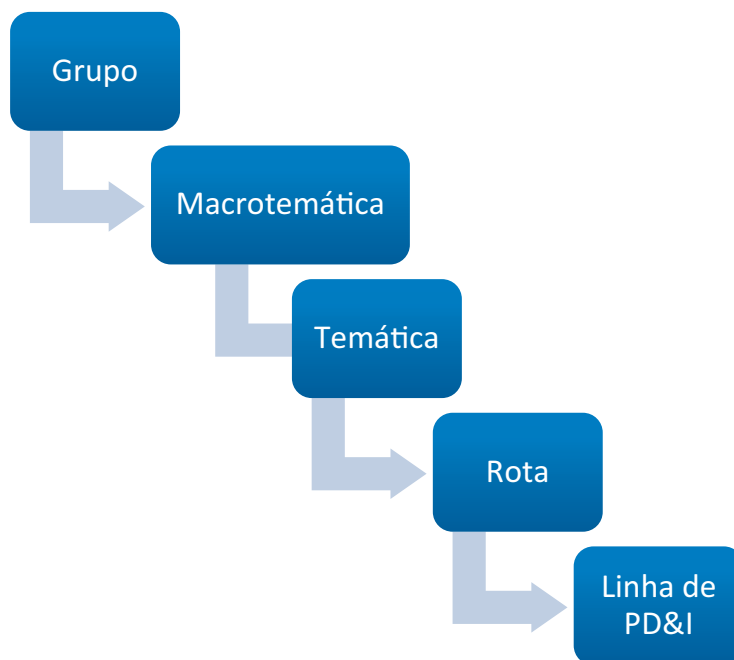


Figura 5 - Categorização do mapa do conhecimento

Fonte: Elaboração própria.

Esta estratificação teve um objetivo de facilitar o processo de mapeamento. Inicialmente o estudo é dividido em cinco grupos, e para cada grupo foi definido um responsável pelo trabalho, desde identificar pesquisadores até auxiliá-los nas atividades. A macrotemática compõe o nível que se trabalha com a identificação de especialistas e com a aplicação de indicadores. Os níveis de temáticas, rotas e linhas de PD&I são a essência do mapa, cujos níveis de classificação foram criados para ajudar no mapeamento, isto é, na identificação, buscando ser o mais exaustivo possível. O conceito de cada nível é descrito abaixo:

- **Grupo temático:** são as grandes áreas em que foi dividida a áreas de PD&I para o setor de energia elétrica. Guia-se, inicialmente, pela divisão da segmentação usual do setor de energia elétrica (G,T,D,C), mas adiciona-se eficiência energética e assuntos sistêmicos. Este último contempla a parte de comercialização. Os cinco grupos utilizados no projeto são: Geração de energia elétrica e armazenamento de energia; Transmissão de energia elétrica; Distribuição de energia elétrica; Eficiência energética; e Assuntos sistêmicos.
- **Macrotemática:** são os grandes temas associados a cada grupo temático.

- **Temática:** subdivisão mais ampla da macrotemática. A temática pode abordar uma problemática a ser resolvida pela pesquisa.
- **Rota tecnológica:** diferentes caminhos propostos de tecnologias ou conhecimentos, passíveis de PD&I, para solucionar as questões da temática.
- **Linhas de PD&I:** pesquisas necessárias, observadas no contexto da rota tecnológica. Várias linhas podem compor um projeto de P&D, assim como uma linha pode gerar vários projetos.

Conforme comentado anteriormente, o mapa, além de apresentar a categorização que o define, também traz algumas informações adicionais, conforme podemos verificar na Figura 6, que mostra a representação gráfica do mapa do conhecimento e cujos conceitos são apresentados a seguir, mas serão melhor detalhados na sequência:

- **Estágio de maturidade tecnológica (EMT):** mostra em qual nível de desenvolvimento na cadeia de inovação que a rota se encontra atualmente.
- **Priorização (P):** ordenamento das rotas tecnológicas elaborado durante o painel de especialistas.
- **Etapa de implementação (Etapa):** categorização da linha de pesquisa no que tange a qual etapa de implementação se refere a tecnologia, ou o conhecimento, que será o resultado da rota:
 - Sistema: tecnologia/conhecimento que será a solução completa a ser desenvolvida pela rota;
 - Planejamento: linhas de PD&I que envolvem a fase que antecede a implantação do sistema, seja o projeto, sejam estudos referentes ao planejamento da tecnologia/conhecimento, ou a um de seus componentes;
 - Implantação: linhas de PD&I que se referem à logística de construção e de implantação do sistema;
 - Operação: linhas de PD&I que envolvem a fase de operação do sistema;
 - Manutenção: linhas de PD&I que envolvem a fase de manutenção do sistema; e
 - Descarte: linhas de PD&I que envolvem a fase de desconstrução do sistema.



TEMATICA	ROTA TECNOLÓGICA	EMT	PRIOR.	LINHAS DE PD&I	ETAPA
Materiais Super condutores de Alta Temperatura Crítica	Fitas de Alta Temperatura 2G - estrutura multicamadas na forma de filmes finos	B	6	Desenvolvimento, processamento e caracterização de materiais supercondutores de alta temperatura crítica para aplicações tecnológicas	S
				Avaliação das propriedades de materiais supercondutores de alta temperatura crítica para aplicações tecnológicas (testes, ensaios, simulações computacionais)	S
				Estudo da aplicabilidade e viabilidade de materiais supercondutores de alta temperatura em equipamentos e dispositivos elétricos de potência	P
				Desenvolvimento da produção de elementos de terras raras para uso na produção de fitas 2G	P
	Processos de fabricação de fios MgB2	B	10	Desenvolvimento de fios Supercondutores à base de MgB2 para aplicações Tecnológicas	S
				Estudo da aplicabilidade e viabilidade de fios de MgB2 em equipamentos e dispositivos elétricos de potência	P
Aplicações da Supercondutividade no Setor Elétrico de Potência	Limitadores de Corrente de Curto Circuito Supercondutores	M	1	Desenvolvimento de Limitadores de Corrente de Curto Circuito à base de materiais supercondutores para proteção de Sistemas de Potência	S
				Estudo da aplicabilidade e viabilidade de implantação de Limitadores de Corrente de Curto Circuito Supercondutores na rede elétrica nacional	P
				Desenvolvimento de planta piloto com limitadores importados	I
	Cabos Supercondutores	B	2	Desenvolvimento de cabos supercondutores para transmissão e distribuição de energia elétrica em sistemas de potência	S
				Estudo da aplicabilidade e viabilidade de implantação de cabos supercondutores na rede elétrica nacional	P
				Desenvolvimento de planta piloto com cabos supercondutores importados	I
	Transformadores Supercondutores	B	7	Desenvolvimento de transformadores supercondutores para sistemas de potência	S
				Estudo da aplicabilidade e viabilidade de implantação de transformadores supercondutores na rede elétrica nacional	P
				Desenvolvimento de planta piloto de transformadores supercondutores importados	I
	Aerogeradores Supercondutores	B	3	Desenvolvimento de aerogeradores supercondutores para sistemas de potência	S
				Estudo da aplicabilidade e viabilidade de implantação de aerogeradores supercondutores na rede elétrica nacional	P
				Desenvolvimento de planta piloto de aerogeradores supercondutores importados	I
	Armazenadores de Energia Supercondutores (Flywheel)	M	5	Desenvolvimento de armazenadores de energia supercondutores	S
				Estudo da aplicabilidade e viabilidade de implantação de armazenadores de energia supercondutores na rede elétrica nacional	P
				Desenvolvimento de planta piloto de armazenadores de energia supercondutores importados	I
Armazenadores de Energia Supercondutores (SMES)	B	9	Desenvolvimento de armazenadores de energia supercondutores	S	
			Estudo da aplicabilidade e viabilidade de implantação de armazenadores de energia supercondutores na rede elétrica nacional	P	
			Desenvolvimento de planta piloto de armazenadores de energia supercondutores importados	I	

TEMATICA	ROTA TECNOLÓGICA	EMT	PRIO.	LINHAS DE PD&I	ETAPA
Sistemas ancilares e isolantes	Sistemas de Refrigeração Criogênica para Equipamentos Supercondutores	B	4	Desenvolvimento de sistemas criogênicos para supercondutividade aplicada ao sistema de potência	S
				Estudo da aplicabilidade e viabilidade de sistemas criogênicos em equipamentos e dispositivos elétricos de potência	P
	Isolantes Elétricos Para Baixas Temperaturas	B	8	Desenvolvimento de sistemas de isolamento para aplicações da supercondutividade ao sistema de potência	S
				Avaliação do comportamento e propriedades de isolantes elétricos para temperaturas criogênicas	S
				Estudo da aplicabilidade e viabilidade de isolantes para equipamentos e dispositivos elétricos de potência	P
				Descarte de isolantes de protótipos de equipamentos e dispositivos elétricos de potência	D

EMT = Estágio de Maturidade Tecnológica. A (alto); M (médio); B (Baixo).

Prio. = Priorização. 1 = prio. máx

Etapa: S (sistema); P (planejamento); I (implantação);

O (operação); M (manutenção); D (descarte).

Figura 6 - Exemplo de mapa do conhecimento da macrotemática Supercondutores

Fonte: Elaboração própria.

O mapa do conhecimento foi construído inicialmente na etapa de Diagnóstico e aprimorado na etapa de Construção de Futuro, após a definição das diretrizes dadas na visão de futuro. Isto é, após definir o futuro desejado foi preciso verificar se as rotas e as linhas identificadas no mapa do conhecimento responderiam ao objetivo traçado. Nesta etapa de construção do futuro, além de ajustar o mapa do conhecimento, foi realizada também uma fundamentação das rotas.

2.3.2. Fundamentação da evolução das rotas

Conforme explicado anteriormente, o processo da etapa “construção de futuro” se inicia com as definições das diretrizes estabelecidas na construção da “visão de futuro”. Em seguida, é verificado se o mapa do conhecimento, elaborado na etapa anterior (diagnóstico), é adequado para que sejam alcançados os objetivos traçados pela “visão de futuro”. Depois, é preparada a trajetória da maturidade tecnológica de cada rota. Ao final, são construídos os *roadmaps*. Todavia, para planejar essas trajetórias, foi importante descrever o contexto que fundamenta a evolução de cada rota, baseado nos objetivos de horizontes específicos (de curto, médio e longo prazos) traçados na visão de futuro.



Para o desenvolvimento dessa fundamentação, foi definido um método baseado em alguns parâmetros predefinidos e em como estes se comportam ao longo dos horizontes analisados e como afetam cada rota da macrotemática.

Para ajudar na definição desses parâmetros, foram utilizadas as dimensões de análise definidas na etapa de diagnóstico: socioambiental; indústria e mercado; estrutura de CTI; produção de CTI; e estratégia. Também foram consideradas as suas subdimensões: aspectos ambientais e sociais; demanda nacional, demanda global e cadeia produtiva; recursos humanos no Brasil, infraestrutura física de CTI no Brasil e rede colaborativa; produção científica e de patentes mundial, produção científica e de patentes nacional; regulação; política, governança, incentivos, aspectos culturais e outros fatores externos (não tecnológicos). Para cada uma delas, criaram-se questões para orientar os especialistas das macrotemáticas na definição dos parâmetros, métricas ou condicionantes e em como analisá-los. Além das dimensões e das subdimensões definidas na etapa de diagnóstico, foi incluída a dimensão “evolução tecnológica” e as subdimensões “parâmetros tecnológicos determinantes para a evolução tecnológica” e a “interdependência ou influência da evolução de outras rotas”. A Tabela 4 mostra a definição de cada subdimensão e qual a questão que deve ser respondida.

Tabela 4 - Questões orientativas para a fundamentação das trajetórias da maturidade tecnológica

Dimensões	Subdimensão de análise	Questões
Evolução tecnológica	Parâmetros tecnológicos determinantes para a evolução tecnológica	Qual o indicador tecnológico é o parâmetro determinante da evolução tecnológica desta rota? Por exemplo, fator de capacidade ou eficiência da geração? Para cada parâmetro definido é preciso informar o quanto evolui no período.
	Interdependência ou influência da evolução de outras rotas	A evolução desta rota ela influencia ou é influenciada ou até mesmo dependente da evolução de outra rota ou até mesmo de outra macrotemática ou grupo temático?
Estratégia Setorial	Regulação	Se refere aos marcos regulatórios no Brasil que possam incentivar o desenvolvimento tecnológico da rota. Identificar qual o foco desta regulação. Você considera que aumenta (A) ou diminui (D)?
	política, governança, incentivos	Se refere às possibilidades de incentivos para o desenvolvimento da tecnologia relacionada à rota. Comparado com o período anterior, você considera que haverá incentivo? (S - sim; N - não) e a política? E a governança ela favorece o desenvolvimento? como estas dimensões podem influenciar o desenvolvimento da tecnologia?
	cultura e ou outros fatores externos (não tecnológicos)	a evolução de algum fator cultural, urbano ou rural influencia o desenvolvimento da tecnologia? Aumentando ou diminuindo o incentivo a sua evolução?

Dimensões	Subdimensão de análise	Questões
Sócioambiental	Aspectos Ambientais	Se refere aos efeitos ambientais (positivos ou negativos) provocados pela tecnologia sobre as mudanças climáticas globais, assim como aos efeitos ambientais provocados pela tecnologia no local da implantação (poluição local). Comparando ao período anterior, você considera que aumenta (A) ou diminui (D)? Especifique qual o impacto. A tecnologia evoluiu ao longo do tempo buscando reduzir este impacto? como? Ela atende apenas a evolução da exigência da regulação ou mais (vale ressaltar que o atendimento da evolução da regulação ambiental pode ser uma grande evolução em alguns casos)? como o ambiente externo, seja pela política e/ou regulação evoluiu na influência na evolução da tecnologia em resposta ao impacto ambiental e social?
	Aspectos sociais e culturais	Se refere à expectativa que o desenvolvimento tecnológico desta rota gere impacto social e/ou cultural, tal como na geração de empregos (em números ou de maiores salários ou de melhor qualidade, etc.) decorrente do desenvolvimento e da aplicação da tecnologia. Conflitos sobre o uso da terra e do recurso, concentração de especialistas em algumas regiões (perceba que isto pode ser algo ruim em algumas macrotemáticas, mas não em outras), etc. Comparando ao período anterior, você considera que aumenta (A) ou diminui (D)?
Produção de CT&I	Produção Científica e de patentes em âmbito internacional	Se refere a publicação científica e de aplicação de pedidos de patentes em âmbito internacional. Comparando ao período anterior, você considera que aumenta (A) ou diminui (D)?
	Produção Científica e de patentes em âmbito nacional	Se refere a publicação científica e de aplicação de pedidos de patentes no Brasil. Comparando ao período anterior, você considera que aumenta (A) ou diminui (D)?
Estrutura de CT&I	Recursos Humanos no Brasil	Se refere à expectativa sobre a evolução do número de pesquisadores nos diversos níveis de capacitação (técnico/graduação/especialista/mestres e doutores) no Brasil. Comparando ao período anterior, você considera que aumenta (A) ou diminui (D)?
	Infraestrutura de CT&I no Brasil	Se refere à evolução da infraestrutura de CT&I (laboratórios e/ou centros de pesquisa) no Brasil. Qual sua expectativa sobre a evolução do número de laboratórios, você considera que aumenta (A) ou diminui (D)? Qual o tipo de laboratório: pesquisa ou teste (demonstração/certificação/ ensaios de padrões)?
	Rede colaborativa	Você considera um cenário onde os centros e pesquisadores desta rota vão trabalhar em formas de redes colaborativas, ou descentralizada? centros de pesquisas e empresas? Os trabalhos como coautorias devem aumentar? Como você imagina que esta questão evoluiu nos períodos de tempo indicados (por rota)?
Indústria e Mercado	Percepção sobre a demanda no mercado nacional	Classificar sua expectativa sobre a demanda pela tecnologia gerada em: I- inexistente; B - Baixa; A - Alta.
	Percepção sobre a demanda no mercado global	Classificar sua expectativa sobre a demanda pela tecnologia gerada em: I- inexistente; B - Baixa; A - Alta.
	Cadeia produtiva	Se refere à capacidade do parque fabril nacional no sentido de viabilizar a implantação no sistema

Fonte: Elaboração própria.



Além da abordagem pelas dimensões de análise, cada macrotemática também descreve outras informações pertinentes para fundamentar a sua evolução para atingir os objetivos traçados em cada horizonte. Este método conjunto busca explicar a evolução das rotas.

Considerando-se essa estratégia, as informações e os valores atribuídos aos parâmetros, métricas ou condicionantes puderam subsidiar a construção dos *roadmaps* das rotas tecnológicas. Para cada parâmetro, foram inferidos conteúdos que justificassem a característica da evolução da maturidade tecnológica das rotas. Com base nessas informações, são identificados os fatores portadores de futuro que podem ser fatores limitadores ou facilitadores do desenvolvimento tecnológico da rota ao longo dos horizontes analisados.

Essa fundamentação baseou-se na literatura e em argumentos de especialistas, que deram sustentação às informações, e é a base da construção da evolução da maturidade tecnológica.

2.3.3. Evolução da maturidade tecnológica

A maturidade tecnológica identifica a evolução do estágio de desenvolvimento de uma tecnologia ou conhecimento na cadeia da inovação. Vários autores se utilizaram de métricas distintas, sendo as mais utilizadas aquelas baseadas nos conceitos apresentados por Frascari (2007) e no Manual de Oslo (OCDE, 2005). O Manual da Aneel (2012) utiliza as seguintes fases de inovação: pesquisa básica dirigida; pesquisa aplicada; desenvolvimento experimental; cabeça de série; lote pioneiro; e inserção no mercado.

Todavia como o projeto trabalha com muitos pesquisadores de áreas, formações e escolas diferentes, procuramos uma ferramenta que pudesse parametrizar melhor. Assim, o projeto utiliza a métrica e o ferramental do *Technology Readiness Level* (TRL) como base para levantar a percepção dos especialistas para os cálculos dos estágios de maturidade.

O TRL é uma métrica desenvolvida pela *National Aeronautics and Space Administration* (Nasa) e adaptado pelo *Department of Energy - US* (DOE, 2011). No processo do TRL formal é necessário levantar as evidências sobre as respostas apresentadas. No caso do projeto, como o objetivo é ter uma referência estimada sobre o estágio de maturidade para uma análise geral do setor, e não uma decisão concreta e detalhada para a construção de um plano de desenvolvimento tecnológico de uma tecnologia (*Technology Maturation Plan - TMP*), que é um dos objetivos propostos para o TRL, não foram levantadas as evidências e nem utilizada a metodologia completa do processo (*Technology Readiness Assessment - TRA*) (DOE, 2011). Apenas utilizou-se o TRL como uma medida para “estimar”

a maturidade tecnológica, por meio da percepção dos especialistas, tomando como referências as perguntas do questionário proposto por sua metodologia (DOE, 2011).

O TRL possui nove estágios, em que: o TRL 1 representa o mais baixo nível de prontidão tecnológica; e o nono nível, estágio final do TRL, é o produto pronto para a comercialização, sistema em uso. As etapas passam desde a parte de papers, artigos, P&D, testes em bancadas, testes em ambientes realistas, até a prontidão final. Devido às incertezas associadas à adaptação deste processo, utilizado pelo projeto prospecção, optou-se por criar três categorias que abrangem faixas dos níveis de TRL. As categorias foram classificadas em baixo, médio e alto estágios de maturidade tecnológica. Os requisitos para cada nível são apresentados na Tabela 5.

- Baixo: tecnologias que apresentam os requisitos dos níveis do TRL de 1 a 3;
- Médio: tecnologias que apresentam os requisitos dos níveis do TRL de 4 a 6;
- Alto: tecnologias que apresentam os requisitos dos níveis do TRL de 7 a 9.



Tabela 5 - Requisitos para os níveis de TRL

Nível	Requisitos
TRL 1 - Os princípios básicos da tecnologia são observados e reportados, mas ainda não se realizou pesquisa aplicada, nem desenvolvimento	Leis e pressupostos definidos
	Pesquisas publicadas
	Hipótese de pesquisa formulada
TRL 2 - Tecnologia já possui algum grau de sustentação: foram observados alguns princípios básicos e iniciou-se a PD&I, mas as aplicações ainda são especulativas	Identificação e caracterização dos elementos básicos
	Previsão de desempenho definida
	Conceito embasado em análises e aplicações por meio de publicações
TRL 3 - Foram realizados estudos experimentais e analíticos para validar as predições acerca da tecnologia; esses estudos constituem uma prova de conceito preliminar da tecnologia, realizada em ambiente laboratorial	Definição dos experimentos que precisam ser realizados
	Realização de experimentos laboratoriais para verificar a viabilidade de aplicação
TRL 4 - Os componentes tecnológicos básicos são desenhados, desenvolvidos e integrados para verificar se trabalham em conjunto; no caso de <i>softwares</i> , inserem-se nesta etapa os <i>alpha tests</i>	Viabilidade científica comprovada
	Componentes testados por meio de laboratório ou fornecedor
	Integração dos protótipos testados em laboratório em um ambiente de simulação operacional
TRL 5 - Integração dos componentes tecnológicos e teste das aplicações em um ambiente realístico	Testes laboratoriais bem sucedidos
	Funcionalidade demonstrada em ambiente simplificado
	Interação de componentes e sistemas
TRL 6 - Demonstração e/ou avaliação do protótipo ou modelo representativo em ambiente relevante	Testes laboratoriais com protótipo em ambiente com configuração de performance, peso e volume desejados
	Integração dos módulos/funcões com plena funcionalidade em laboratório
	Resultados de testes com protótipo em ambiente operacional
TRL 7 - Avaliação em escala real do protótipo do sistema em ambiente operacional	Protótipo testado em ambiente realista
	Funcionalidade do protótipo para lidar com problemas reais em grande escala
	Funcionalidades disponíveis em ambiente operacional já simuladas
TRL 8 - Sistema concluído e qualificado por meio de testes e demonstrações, estando em conformidade com as condições especificadas	Protótipo integrado, em ambiente operacional real ou simulado
	Protótipo testado em ambiente de campo
	Demonstração de todas as funcionalidades em ambiente operacional
TRL 9 - O sistema incorpora a nova tecnologia na sua forma final, sendo aplicado em condições reais esperadas; encontra-se pronto para comercialização	Implementação do conceito operacional
	Demonstração do sistema real

Fonte: Elaboração própria com base no DOE (2011).

Para a elaboração da curva da evolução da maturidade tecnológica, para cada marco de ano (2017, 2020, 2025, 2030, 2040, 2050) os especialistas respondiam o questionário (metodologia do TRL) e assim a equipe identificava em qual estágio aquela tecnologia estaria no ano em questão.

2.3.4. Priorização

A priorização desta etapa é feita no nível de rotas com base nas informações anteriores. Portanto, ela é orientada pelos objetivos definidos na visão de futuro, levando em consideração os caminhos possíveis, traçados no mapa do conhecimento, e a velocidade percorrida por estes caminhos, traçada na evolução da maturidade tecnológica.

Não foi utilizado o multicritério nesta priorização em função desta ser no nível de rotas e não no de macrotemática. Portanto, não se tem a informação dos indicadores que foram calculados apenas no contexto da macrotemática.

2.4. Construção dos *roadmaps*

O projeto *Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica*, conforme apresentado utiliza-se de vários métodos em um exercício de foresight (ver Figura 7).

Ao final da etapa de construção de futuro foi utilizado o método *Technology Roadmapping* em harmonia com os outros métodos e ferramentas utilizados nessa etapa (cenários e TRL, por exemplo). Vários autores fundamentam o termo roadmapping e abordam o método que remete às suas primeiras aplicações, nas décadas de 1970 e 1980, por empresas como a Motorola, dentre outras. Uma breve e rica revisão deste referencial teórico pode ser encontrada em Lopes et al. (2011). Algumas definições merecem ser ressaltadas, especialmente os diferentes textos de Phaal, Farrukh e Probert:

- Significa um processo de planejamento tecnológico para identificar, selecionar e desenvolver as alternativas tecnológicas com o objetivo de atender a um conjunto de necessidades pré-elaboradas por uma ou mais empresas (BRAY; GARCIA, 1998 apud LOPES et al., 2011).
- O método Technology Roadmapping é constituído de sucessivas etapas de coleta e análise de dados (workshops), fornecendo informações importantes que servem de base para a tomada das decisões estratégicas. Já os resultados destas etapas são organizados em relatórios e mapas de suporte, que serão utilizados como inputs para o mapa final (PHAAL; FARRUKH; PROBERT, 2001. apud LOPES et al. 2011.).



- Um grande número de abordagens (ferramentas) foi desenvolvido por gestores, consultores e acadêmicos para compreender as questões conceituais e práticas associadas à gestão da tecnologia. Tais ferramentas podem assumir muitas formas, incluindo as matrizes, quadros, gráficos, listas de verificação, taxonomias e software, juntamente com as possibilidades de combinações entre essas formas (PHAAL; FARRUKH; PROBERT, 2006. apud LOPES et al. 2011).
- A disposição de um roadmap pode ser generalizada, contendo ilustrações de várias camadas e subcamadas (temas estratégicos), sendo identificadas três camadas externas (incorporando os temas das subcamadas), permitindo a generalização e aplicação do conhecimento em diversas situações (Figura 1), em que (PHAAL; FARRUKH; PROBERT, 2005 apud LOPES et al. 2011)): 1. As camadas superiores do roadmap tratam dos propósitos (know-why) que cada organização aspira juntamente com os fatores que influenciam cada propósito. Usualmente, no nível empresarial, esta camada contém as perspectivas externa e interna. Alguns assuntos encontrados normalmente neste nível são: mercado, consumidores, competidores, ambiente, indústria, negócio, tendências, motivação, ameaças, objetivos, marcos e estratégia; 2 - As camadas intermediárias do roadmap dizem respeito aos mecanismos utilizados para o alcance dos objetivos, sendo de extrema importância, pois funcionam como uma ponte entre o propósito e os recursos, determinando o que fazer (know-what). Em nível empresarial, essas camadas tratam de produtos, serviços, operações entre outros, sendo ligadas diretamente à geração de receita; 3 - As camadas inferiores do roadmap tratam dos recursos (incluindo tecnológicos) que precisam estar ordenados e integrados para o desenvolvimento dos mecanismos de entrega (know-how). Nesta camada serão empregadas técnicas de como fazer (know-how), utilizadas para atender à demanda estipulada nas camadas superiores. Outros recursos abordados neste nível são: habilidades, parcerias, fornecedores, instalações, infraestrutura, organização, normas, ciência, finanças e projetos de P&D.

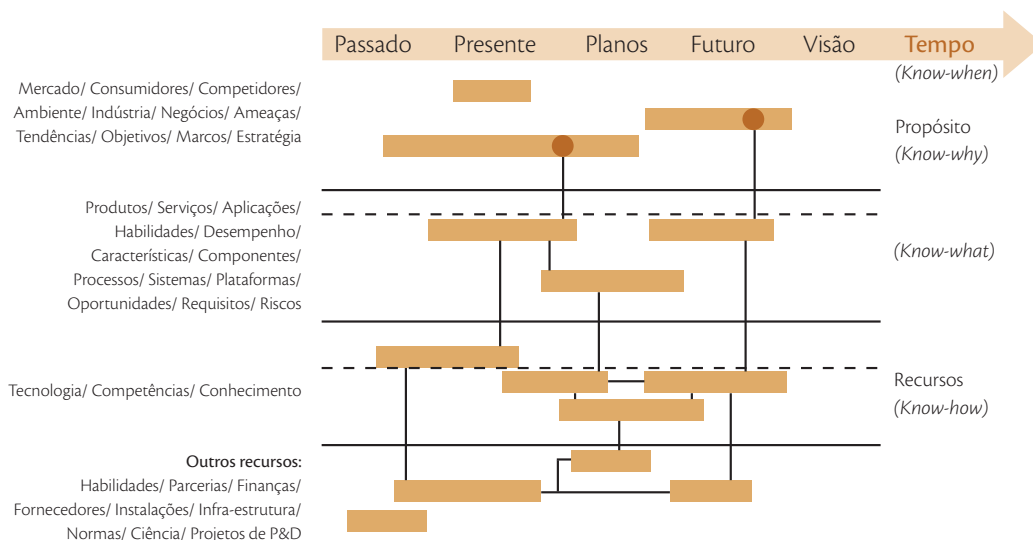


Figura 7 - Roadmap genérico para a conexão entre recursos para os objetivos

Fonte: PHAAL; FARRUKH; PROBERT (2005) apud LOPES et al. (2011).

Com base nos conceitos apresentados, o projeto *Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica* utiliza a definição de *roadmap* tecnológico como uma ferramenta de apoio ao planejamento de CTI, que apresenta um formato conjunto gráfico e tabela que resume e destaca as principais informações sobre a evolução e o desenvolvimento de cada rota tecnológica ou de conhecimento, do estágio em que a solução se encontra até chegar ao seu mais elevado nível de maturidade tecnológica, percorrendo a cadeia de inovação em atendimento aos objetivos traçados na visão de futuro e todas as informações trabalhadas nesta etapa. A natureza desta metodologia é diversificada, podendo incluir questões de mercado, políticas de fomento de um determinado setor e o desenvolvimento de uma tecnologia condicionante,²⁵ por exemplo. O método detalhado na fase de fundamentação das rotas define quais parâmetros são trabalhados em cada macrotemática. Esta metodologia utilizada tem o propósito de estabelecer parâmetros, métricas ou condicionantes que apontem as barreiras a serem superadas ou os fatores que impulsionam o desenvolvimento de uma certa rota ao nível de maturidade programado, naquele período. Esses indicadores são caracterizados como fatores portadores de futuro (ver Gráfico 9 e Tabela 6).

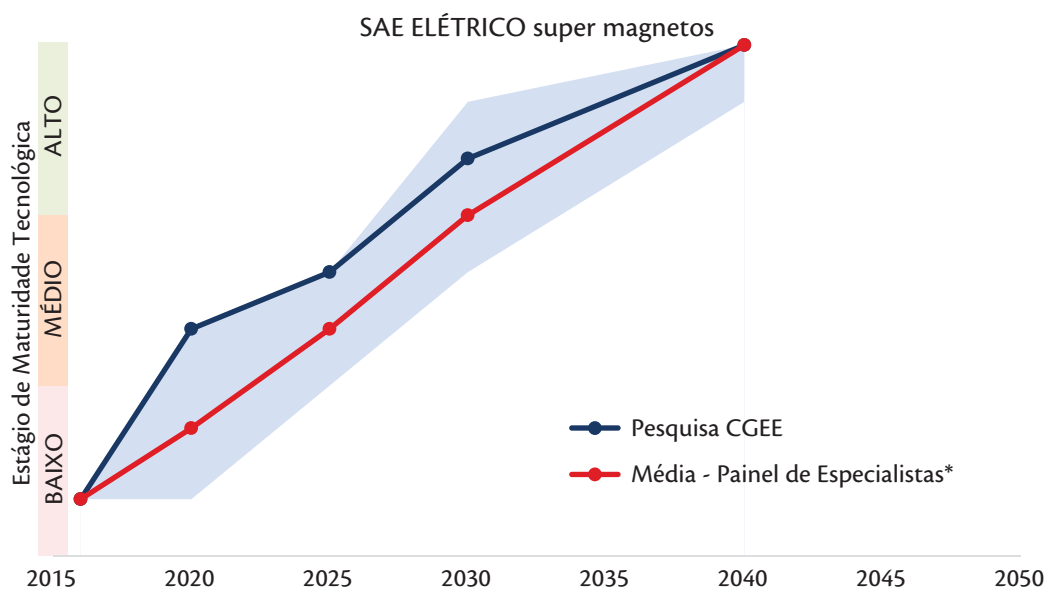


Gráfico 9 - Evolução da maturidade tecnológica da rota

Fonte: Elaboração própria.

²⁵ Tecnologia condicionante: corresponde a uma tecnologia, ou conhecimento, que precisa ser desenvolvida para que a tecnologia principal possa evoluir.



Tabela 6 - Caracterização do *roadmap* para uma determinada rota tecnológica

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Armazenamento Elétrico	Magnéticos Supercondutores	Fatores portadores de futuro	Crescimento da demanda por armazenamento	Investimentos iniciais (R\$), repotenciação da cadeia de CT&I e da cadeia produtiva	Desenvolvimento das redes elétricas inteligentes e da GD	Métodos e tecnologias de implantação junto aos sistemas de geração	Protótipos, metodologias e métricas para testes e homologação Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação	

Fonte: Elaboração própria.

O *roadmap* tecnológico do projeto tem o objetivo de apresentar, portanto, a observação da evolução da maturidade tecnológica de rota, justificada pelos fatores portadores de futuro. Entende-se, neste projeto, que uma rota tecnológica pode abrigar inúmeros desenvolvimentos. Foi necessário, portanto, identificar um segmento de pesquisa que pudesse caracterizar a evolução da maturidade dessa rota. Neste processo, foram levados em conta a importância da pesquisa para aquela rota e a complexidade e a duração (maior prazo) para o seu desenvolvimento. Desta forma, é possível inferir que, sendo desenvolvido esse segmento, as demais pesquisas podem evoluir no prazo especificado com o uso de soluções adequadas.

2.5. Execução do processo

As diretrizes específicas de cada macrotemática foram elaboradas com o auxílio de pesquisadores de diferentes instituições, específicos de cada macrotemática, com o auxílio e a orientação do núcleo de metodologia do projeto (equipe direta do projeto). O processo de construção passou por três etapas: fase de balizamento; desenvolvimento; e ajustes finais.

2.5.1. Fase balizamento

Esta fase teve o objetivo de fornecer as informações e o entendimento do processo e dos conceitos envolvidos. Para isto, foram entregues a cada pesquisador de cada macrotemática dois conjuntos de documentos orientativos: o cenário setorial geral; e o conjunto de documentos orientativos. Este último foi elaborado pelo núcleo de metodologia do projeto e apresenta a metodologia e o processo de construção, abordando conceitos, diretrizes, anexos complementares e exemplos. Foi composto de um documento escrito e de uma apresentação gravada e disponibilizada a todos os pesquisadores via internet. Nesta fase, foram necessárias diversas interações remotas, por e-mail, Skype e telefone, de maneira a orientar, ao máximo e de forma homogênea, os diferentes pesquisadores das 48 macrotemáticas. Após algumas versões preliminares, este processo resultou na primeira versão que foi apresentada em uma reunião presencial com toda a equipe (pesquisadores externos e equipe direta do CGEE). O objetivo da reunião foi cada pesquisador apresentar ao núcleo metodológico do projeto a sua primeira versão sobre as partes que compõem a visão de futuro específica da macrotemática; o mapa do conhecimento revisado; a fundamentação; a evolução da maturidade tecnológica; e a priorização. Nesta reunião, cada pesquisador recebeu as orientações sobre os devidos ajustes a serem realizados pela equipe direta do CGEE que compõe o núcleo de metodologia do projeto. Por fim, foi encaminhado por e-mail um conjunto de orientações adicionais (aos primeiros documentos) resultantes das dificuldades dos pesquisadores percebidas pela equipe direta do CGEE nesse processo.

2.5.2. Desenvolvimento

Após a fase de balizamento, cada pesquisador fez os devidos ajustes, novamente interagindo remotamente com a equipe do núcleo de metodologia do projeto. Esta fase foi a mais demorada, gerou diferentes versões preliminares até chegar a uma versão que foi apresentada no painel de especialistas realizado para cada macrotemática.

Painel de especialistas

Para cada macrotemática foi realizado um painel de especialistas, variando de seis a 15 participantes, buscando sempre obedecer um formato diversificado de perfis. A orientação inicial foi para que, sempre que possível, os painéis tivessem representantes da academia, de laboratórios e de centros de pesquisa; da governança do setor elétrico (MME, Aneel, ONS, EPE, CCEE, MCTIC, MDIC, Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) etc.); de empresas do setor elétrico; e de empresas da



cadeia produtiva (indústria, fornecedores de equipamentos). Outra orientação foi ter participantes de diferentes escolas e pensamentos e pesquisadores de grupos de trabalhos diversificados. O resultado foi que mais de 400 especialistas de diferentes perfis e regiões do país participaram de 46 reuniões mediadas pela equipe do CGEE.

A dinâmica do painel de especialistas foi bem expositiva, com debates e atuação dos participantes, que receberam, com antecedência, o resumo do conteúdo a ser debatido na reunião específica da macrotemática para a qual tinham sido convidados. Todas as 46 reuniões obedeceram a ordem da dinâmica que segue a lógica da execução da etapa “construção de futuro”:

- 1) debater, ajustar e validar dois dos três componentes da Visão de futuro: objetivo geral e objetivo específico;
- 2) debater, ajustar e validar o mapa do conhecimento em função da visão de futuro validada;
- 3) debater, ajustar e validar as trajetórias de evolução da maturidade das rotas que compõem a macrotemática;
- 4) levantar a percepção de cada especialista sobre a prioridade das rotas em função dos três itens validados anteriormente;
- 5) validar em uma segunda rodada uma versão consolidada da prioridade, segundo as percepções de todos os participantes.

No primeiro ponto da pauta da reunião, a equipe do CGEE apresentou, de maneira resumida, a visão de futuro específica da macrotemática, enviada previamente aos participantes. Cada participante teve a oportunidade de colocar as suas percepções e complementar o que tinha sido enviado previamente, também apresentado na reunião. O fim se dava quando havia um consenso sobre o texto.

Em seguida, o objeto da validação era o mapa do conhecimento, produzido com base no que foi definido no texto da visão de futuro. Da mesma forma que no ponto anterior, a equipe do CGEE apresentou o mapa do conhecimento específico da macrotemática, finalizando quando se chegava a um consenso.

Após trabalhar a visão de futuro e o mapa do conhecimento, o próximo ponto da reunião era avaliar a evolução da maturidade tecnológica de cada rota definida no mapa do conhecimento. Todos os gráficos com as curvas de evolução da maturidade tecnológica foram impressos e expostos na sala. Inicialmente foi explicada a metodologia e distribuído o questionário que orienta o estágio de maturidade baseado no TRL. Após a explicação e os esclarecimentos de dúvidas, cada participante recebia um adesivo com uma cor, assim eles iam até os gráficos e traçavam a curva conforme as suas

expertises no assunto. Ver Figura 8. Neste caso, não se procurou a convergência, e, sim, a área de percepção dos participantes, além de uma média que desconsidera os pontos muito fora da curva.

Foi marcado para cada ano o nível de maturidade tecnológica em que aquela tecnologia deveria estar.

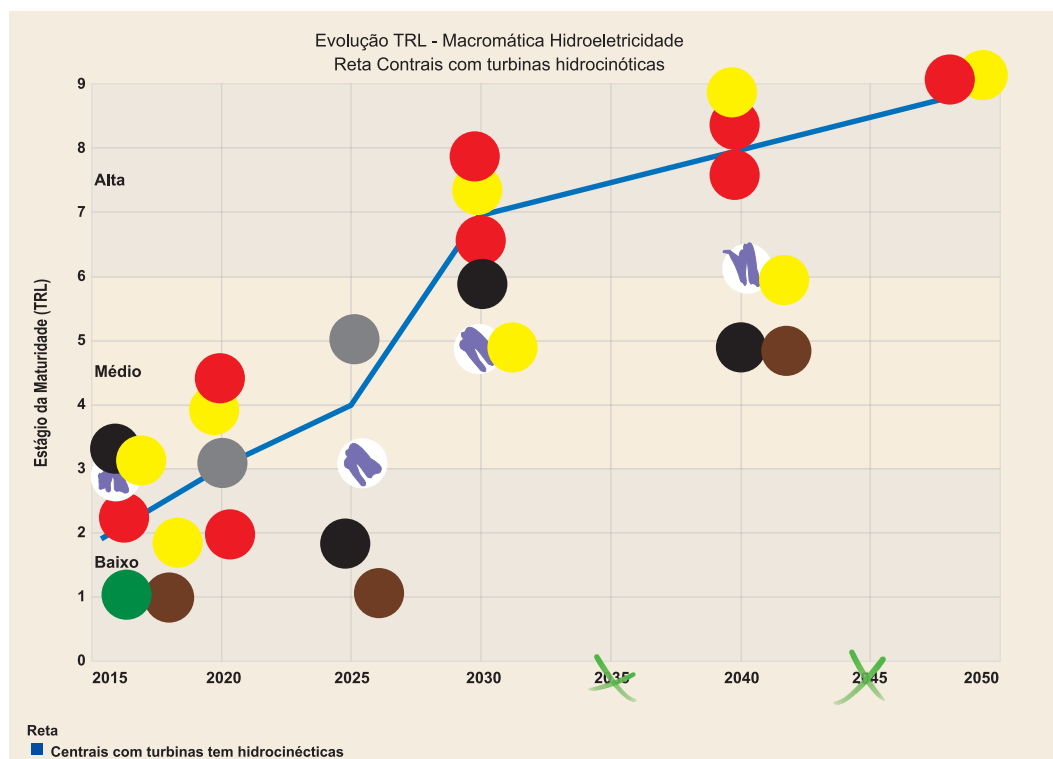


Figura 8 - Exemplo do gráfico de evolução da maturidade tecnológica com a contribuição no painel de especialistas

Fonte: Elaboração própria.

Os dois últimos pontos da reunião se referiam à priorização. Foram realizadas duas rodadas para a priorização das rotas tecnológicas. Os participantes recebiam uma lista com todas as rotas tecnológicas daquela macrotemática e, assim, na primeira rodada eles apresentavam a sua ordenação de forma independente, sem a influência de ninguém, considerando os critérios que julgassem fundamentais, com base nas informações validadas ao longo de toda a reunião. Cada ordenação era colocada em um modelo bem simplificado, para que fosse verificada a convergência. Os resultados eram apresentados para todos os especialistas e um debate era feito para que cada um pudesse explicar o porquê daquela priorização. Caso não houvesse a convergência no debate, uma segunda rodada era



feita, já sob a influência dos outros participantes. Novamente, os resultados eram apresentados e a convergência muitas vezes se dava por meio do consenso dos participantes. Nos casos em que não foi possível ter uma decisão clara da ordem de prioridade, a equipe do CGEE tomou a decisão com base em votação, considerando a maioria simples.

2.5.3. Ajustes finais

Foi elaborado um gráfico final da trajetória da evolução da maturidade, Gráfico 10, após os painéis de especialistas para expressar o resultado ajustado com uma compilação de todas as contribuições.

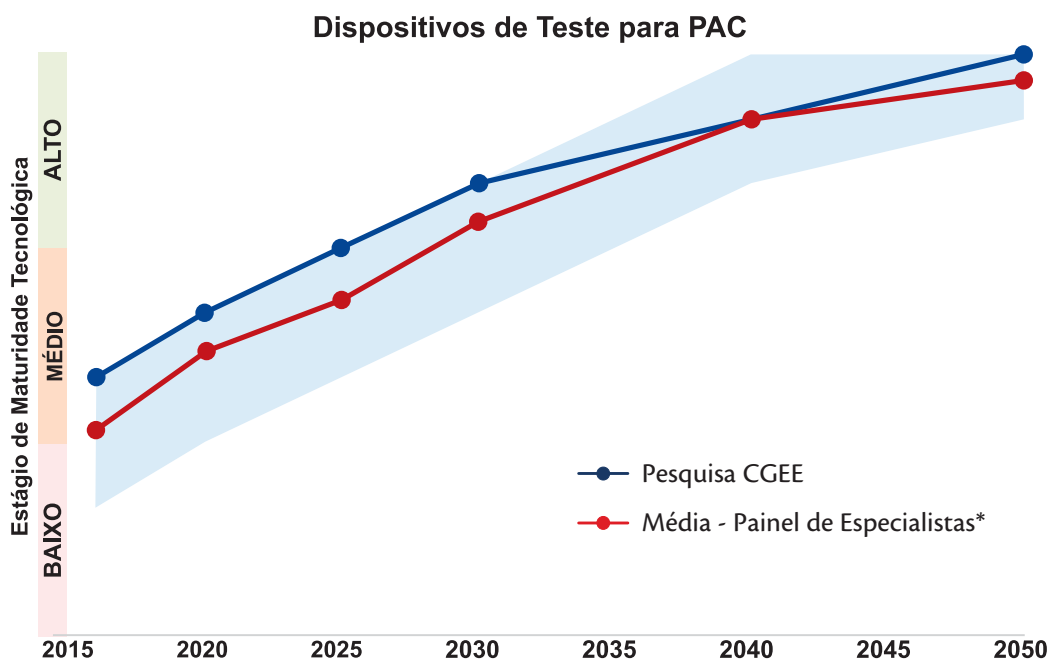


Gráfico 10- Exemplo da evolução do estágio de maturidade

Fonte: Elaboração própria.

A linha azul representa o traço elaborado pelo pesquisador especialista da macrotemática (equipe CGEE) a partir da visão de futuro e dos objetivos específicos para aquela macrotemática. A linha vermelha é a média das opiniões dos participantes que contribuíram durante o painel de especialistas. A faixa azul-clara representa as variações de máximo e mínimo que foram registradas nas contribuições de todos os participantes do painel de especialistas. Nos casos em que apenas um ponto muito fora da

curva foi observado, o que expressava um falso resultado, este ponto não foi considerado. No eixo vertical, estão os estágios de maturidade tecnológica, conforme apresentado na descrição e tabela de requisitos; e no eixo horizontal, o tempo. Cada rota tecnológica possui um gráfico da evolução da maturidade com projeção até 2050.

Com base nos ajustes indicados pelo painel de especialistas, sobre todos os pontos foram feitos novos ajustes nos documentos elaborados para cada macrotemática e novas interações com a equipe do núcleo do CGEE. A versão resultante foi encaminhada aos comitês estratégicos e consultivos do projeto *Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica* e sofreram novos pequenos ajustes para se chegar à versão final.

Considerando-se essa dinâmica, a visão de futuro contempla aspectos da governança, CT&I, cadeia produtiva e Setor Elétrico Brasileiro (SEB) como as reais possibilidades de desenvolvimento de leis e normas, de estruturas de aporte à ciência, tecnologia e inovação, além da capacidade futura da indústria nacional em produzir, levando em conta a variabilidade do SEB e suas futuras transformações. A visão de futuro, portanto, expressa a factibilidade da execução dos objetivos específicos e, por conseguinte, do objetivo geral.



Capítulo 3



Capítulo 3

Macrotemática Energia Eólica

A geração de eletricidade via energia eólica é uma realidade no setor elétrico brasileiro e a sua participação neste setor tende a ficar ainda mais significativa. Para tanto, os sistemas de geração via energia eólica precisam se modernizar e se adaptar às condições de operação dos ventos brasileiros, nas categorias grande, médio e pequeno portes de aerogeradores.

Neste contexto, as perspectivas de evolução tecnológicas atuais para o Brasil estão focadas, dentre outros, nos seguintes desenvolvimentos:

- Meios de avançar com os problemas de infraestrutura e ter equipamentos maiores que atendam a infraestrutura atual;
- Evolução natural tecnológica de componentes;
- Apoio à operação - com ferramentas para apoiar tanto os operadores de rede quanto os gestores de O&M nos parques eólicos;
- Meios de reduzir custos de instalação e de operação de sistemas de pequeno porte para autoprodução.

Em termos de macrotemática, os principais elementos definidos para a realização das rotas tecnológicas estão relacionados com quatro principais elementos:

- Turbinas eólicas de grande porte;
- Turbinas eólicas de médio porte
- Turbinas eólicas de pequeno porte;
- Ferramentas de apoio à O&M.

A divisão de pequeno, médio e grande porte se dá em razão das particularidades da evolução dos componentes relacionadas ao porte das turbinas eólicas. Em aerogeradores de pequeno porte pode-

se agrupar todas as tecnologias de máquinas para a aplicação em geração distribuída e com potência inferior a 100 kW. As turbinas de médio porte são aquelas que hoje dominam o mercado brasileiro com potência entre 500 kW a 2 MW. As máquinas de grande porte são aquelas com potência acima de 2 MW. Atualmente, novas máquinas com potência de 10 MW a 20 MW são o principal foco de pesquisas, nas quais são estudados novos materiais, técnicas de içamento, novas formas de operação, dentre outros.

A macrotemática foi, portanto, estruturada tal qual mostrado na Figura 9 para direcionar as considerações que serão feitas nesse trabalho.

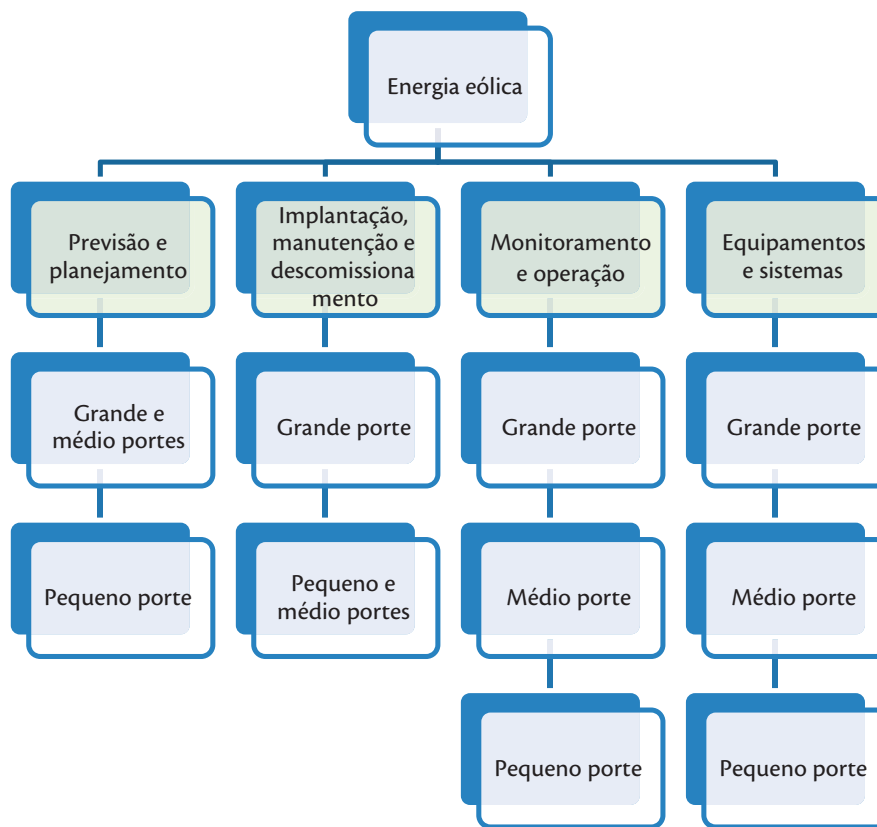


Figura 9 - Caracterização da macrotemática energia eólica (Preenchimento na cor verde; temáticas. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.



Em previsão e planejamento estão incluídas as questões de avaliação e de uso do potencial eólico e a inclusão desse potencial nos planejamentos energéticos e de operação sistêmica (sistema elétrico de potência).

Em manutenção, implementação e descarte de turbinas eólicas foram consideradas questões relacionadas à manutenção dos equipamentos, em que são incluídas técnicas preditivas, novas metodologias, implantação dos projetos e avaliação de potencial entre outras temáticas como infraestrutura para transporte de grandes máquinas, além das questões relacionadas às tecnologias de descarte e processamento de materiais recicláveis.

A temática monitoramento e operação caracteriza as ferramentas de apoio à O&M. Serão incluídas as visões do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e dos operadores de centrais eólicas sobre as novas tecnologias de operações e manutenção e de previsões de geração.

E em equipamentos e sistemas está incluída toda a temática de desenvolvimento de novas tecnologias e componentes de turbinas eólicas: geradores, torres e sistemas de transmissão mecânica, dentre outros.

3.1. Visão de futuro

3.1.1. Cenário setorial

A evolução da demanda de energia elétrica até 2050 deve exigir algo entre 400 GW e 480 GW em capacidade instalada do SIN. Este cenário trará desafios como a diversificação e a ampliação do parque gerador para atender à demanda esperada. Neste contexto, a energia eólica terá uma participação significativa na respectiva matriz, seguindo a atual tendência de mercado no qual essa macrotemática adquire competitividade. A geração eólica continuará, portanto, a se desenvolver no campo *on-shore*, de grande porte. Já no campo *off-shore*, poderá ser marginal, ou seja, poderá ser aplicada ao uso ocasional ou em reservatórios de energia.

Considerando-se a evolução do uso da energia eólica até 2020, existe a previsão da instalação de 43 GW. Até 2050, a estimativa de instalação é de 129 GW na América Latina. Levando-se em consideração a participação do Brasil na América Latina, onde hoje responde por 73% das instalações da região, tem-se um cenário otimista da manutenção dos patamares atuais. É esperada, portanto, uma capacidade instalada de 94 GW no Brasil em 2050.

Atualmente, os valores de investimentos em energia eólica estão em torno de US\$ 1,5 milhão/MW, resultando em um investimento de US\$ 97 bilhões até 2050, dados referentes a um horizonte mais conservador. Este cenário apresenta um enorme mercado com movimentações anuais da ordem de alguns bilhões.

3.1.2. Objetivo geral

Desenvolvimento de turbinas eólicas com novos materiais, novos conceitos e ruptura tecnológicas, de micro a grande portes, com componentes nacionais, além do desenvolvimento de tecnologias dedicadas à previsibilidade da geração de energia elétrica a partir da fonte eólica.

3.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes, que incluem:

Curto prazo (2017-2020):

- Desenvolvimento de tecnologias de previsão da geração de eletricidade via energia eólica (metrologia avançada);
- Desenvolvimento de técnicas de previsão para fins de operação e de expansão da geração eólica.

Médio prazo (2020-2030):

- Estudo com foco no desenvolvimento nacional de componentes para turbinas de médio a grande portes;
- Estudo com foco no desenvolvimento nacional de componentes para turbinas eólicas de pequeno porte (múltiplos usos, GD, sistemas isolados, dentre outros);
- Desenvolvimento de novos componentes para a otimização da produção de grandes turbinas eólicas. Novas tecnologias e até mesmo novas opções construtivas para componentes específicos das turbinas eólicas:



- torres;
- pás de turbinas eólicas;
- multiplicadores de velocidade de novos materiais;
- Desenvolvimento ou aprimoramento de tecnologias de manutenção e comportamento de máquinas (sistemas avançados de medição com tecnologias nacionais);
- Tecnologias de repotenciação e de descomissionamento de parques eólicos;
- Tecnologias avançadas para mitigar os efeitos da intermitência da fonte eólica.

Longo prazo (2030-2050):

- Desenvolver componentes novos (geradores elétricos, conversores, sensores etc.) com possibilidade de autorreparo (*self healing*);
- Desenvolvimento de turbinas eólicas com “DNA” *off-shore* (caracteristicamente projetadas para a aplicação *off-shore*);
- Desenvolvimento de turbinas com novos conceitos (eólicas flutuantes, dentre outros).

3.1.4. Fundamentação

Verifica-se uma tendência mundial sobre a aplicação de sistemas de autorrecuperação para equipamentos. De uma maneira geral, para as centrais eólicas ocorrerá uma evolução natural para o uso desses componentes no futuro.

Como primeiro passo, é importante desenvolver tecnologias que permitam o monitoramento e o mapeamento da qualidade dos ventos brasileiros. Uma ferramenta de previsão de geração eólica é uma das principais demandas por parte dos operadores de rede. No caso atual, a demanda é do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), e no futuro próximo será dos operadores de rede de distribuição. Essa ferramenta fará parte de novos sistemas de controle com capacidade de identificar o modo de operação do parque eólico e fará parte, também, dos sistemas de comunicação integrados aos centros de despacho, para informar a previsão de geração nas próximas horas (dias). Servirá, ainda, de instrumento para orientar o operador do parque eólico (proprietário) sobre as condições operacionais da turbina e quando deverá efetuar manutenção.

Ainda sobre o sistema de controle mais avançado, já é discutida a incorporação de sistemas de monitoramento a laser que, incorporados ao sistema de controle central de usinas eólicas, poderão elevar a eficiência do sistema com a redução dos desligamentos para a manutenção e até pela

redução de tempos de deslocamento de sistema *yaw*. Esta tecnologia está em desenvolvimento e as suas aplicações iniciais são uma realidade. Nesse mesmo desenvolvimento de sistemas de controle para usinas eólicas e para turbinas, deve-se esperar uma evolução na aplicação de ferramentas de manutenção e de monitoramento das condições operacionais da central eólica com a inclusão de sistema de sinalização de problemas em turbinas e de sinalização de futuros problemas e a indicação do tempo máximo para a manutenção preventiva de um determinado componente. Para tal, as turbinas eólicas serão cada vez mais monitoradas com novos sensores a ser instalados nas torres, nos sistemas rotativos e até mesmo na parte elétrica. Essa evolução nos sistemas de controle deverá se dar em várias etapas, e indicativos poderão ser elencados como o desenvolvimento de sistemas de controle com prevenção de falhas até 2020; incorporação de sistemas de monitoramento na operação dos parques eólicos até 2030; e sistemas de controle com o sistema de autorreparo até 2050.

Evoluindo os sistemas de controle, nada mais natural que ocorra a incorporação de inteligência artificial e de novos sistemas de comunicação, o que permitirá que turbinas eólicas tenham a capacidade de executar em sequência: 1. autodiagnóstico (função essa já visualizada em vários componentes); na evolução, 2. operação de isolar módulo em falta; e finalmente 3. capacidade de regenerar com o autorreparo, sendo que esta última etapa refere-se ao uso de novos materiais.

Cada componente deve evoluir para outro equipamento, com menor custo tecnológico, que execute as funções atuais com maior produtividade e robustez. Neste contexto, são pensados basicamente três elementos: torres, pás (configuração de rotores) e sistemas multiplicadores de velocidade.

Atualmente, para a participação das centrais eólicas nas matrizes elétricas de alguns estados e na região Nordeste em particular, observa-se uma necessidade de maior conhecimento de sua operação para a manutenção da estabilidade do sistema elétrico.

Ao ser observado o mercado de usinas *off-shore*, ou seja, de turbinas eólicas instaladas em lagos e nos oceanos, estima-se a sua evolução. Atualmente, as tecnologias de turbinas eólicas *off-shore* são uma adaptação das *on-shore* para o uso nos oceanos. Um dos principais elementos de estudo é a ancoragem (ou não, para turbinas flutuantes). A aplicação de turbinas eólicas *off-shore* tem como limites atuais a profundidade dos mares e lagos, se limitando a oito metros. São verificados testes de sucesso com o uso de sistemas flutuantes para a ancoragem de turbinas eólicas. Além do sistema de ancoragem, estima-se a evolução com a criação de turbinas eólicas com “DNA” *off-shore*, ou seja, criadas especificamente para serem *off-shore*. Hoje, já há concepções de novos desenhos de turbinas com o uso de turbinas eólicas verticais, em que as pás terão comprimentos acima de cem metros com perfis modificados. Neste cenário de evolução, pode-se elencar alguns marcos de desenvolvimento ao longo dos próximos anos: até 2020, não se espera muito desenvolvimento no Brasil, devido ao cenário



de instalações, porém deve ser realizada alguma pesquisa com a instalação de máquinas *off-shore* para testes em baixa profundidade em lagos (em particular, em reservatórios de grandes hidroelétricas). Até 2040, espera-se que existam um mercado e também um forte desenvolvimento de turbinas eólicas *off-shore*, particularmente. Até lá, espera-se que já estejam desenvolvidas as tecnologias de turbinas flutuantes e estejam em franco desenvolvimento as máquinas específicas *off-shore*. Já a expectativa para até 2050, é que ocorra a comercialização de máquinas específicas *off-shore*.

A partir das máquinas eólicas (desenvolvimento tecnológico), pode-se falar da necessidade de serem desenvolvidos novos sensores, entre eles, aqueles para a parte climática, com a elaboração de novos sistemas de medição de vento e de monitoramento de temperatura e turbulência, além de outros elementos que impactam na produção eólica. Esses desenvolvimentos serão importantes também para a produção de sistemas de controle, com novas opções. Atualmente, verifica-se um grande esforço na criação de novos modos de medição a partir do *laser*, com o *Light Detection and Rangin* (Lidar) e com os ultrassônicos. Estima-se que o desenvolvimento de ferramentas para a determinação de potência e para o monitoramento das condições climáticas para a operação das centrais eólicas continuará a acontecer ao longo dos próximos anos. Alguns marcos podem ser: até 2020, espera-se o desenvolvimento e a difusão (popularização) da tecnologia laser para a medição do vento; até 2040, estima-se que os sensores de medição de vento tenham evoluído para novos métodos, com menor interferência local.

Finalmente, como elencado na contextualização e nos objetivos gerais, uma grande área da macrotemática eólica que demandará a atenção de desenvolvimento tecnológico para os próximos anos será a das turbinas eólicas de pequeno porte para uso em autoprodução.

3.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática energia eólica foi caracterizado em resposta a um conjunto de métricas (ver Anexo) que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo, levando-se em conta o período de tempo até 2050.

Considerando-se a evolução tecnológica, as seguintes métricas basicamente estão relacionadas com o aumento do tamanho e da eficiência dos componentes das turbinas eólicas, e são consideradas

barreiras tecnológicas a serem vencidas, mas seguindo com os mesmos moldes atuais de fabricação e de uso em turbinas eólicas:

- *Scale up* dos componentes - pás, superior a 200 m e tecnologias bipartidas;
- *Scale up* dos componentes - sistema de transmissão;
- *Scale up* dos componentes - sistema de conexão elétrica;
- *Scale up* dos componentes - torres;
- Sistema de fundação para *off-shore*.

A métrica sistema de monitoramento (sistema ativo para a melhoria da operação de sistemas eólicos) refere-se à parte de produção de ferramentas de monitoramento ativo de turbinas eólicas. E a métrica desenvolvimento de novos componentes com evolução de *self healing* apresenta uma estimativa para a criação de novos equipamentos com novos materiais.

A métrica desenvolvimento de novos materiais para geradores de pequeno porte relaciona-se com novas turbinas eólicas de pequeno porte. E a métrica controle e monitoramento para aerogeradores de pequeno porte (diferentes estratégias) caracteriza a elaboração de novos sistemas de controle para pequeno porte.

As métricas seguintes caracterizam a evolução de novos desenvolvimentos e barreiras tecnológicas a serem vencidas até 2050:

- Sistema de suporte flutuante aplicável a aerogeradores de grande e pequeno portes;
- Desenvolvimento de novos materiais para geradores com materiais supercondutores;
- Desenvolvimento de novos materiais para torres.

A métrica desenvolvimento de novos modelos computacionais, ferramentas computacionais, sistemas de gerenciamento e comunicação para possibilitar previsão, operação e manutenção de parques eólicos e de sistemas dispersos está diretamente relacionada ao desenvolvimento de novos sistemas de modelagem para parques e pequenas turbinas eólicas que servirão de suporte para: planejamento e operação do sistema elétrico, e terá saídas também para O&M das unidades geradoras, tanto para grande porte, quanto para pequeno porte, já vislumbrando o aumento da geração distribuída.

As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado também constam na planilha de indicadores. E foram respondidas conforme instruções constantes na própria planilha. De uma forma geral, o desenvolvimento



econômico, as novas tecnologias, as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e setor elétrico brasileiro potencializam a melhoria ou a participação dessas questões no setor elétrico brasileiro, com impacto positivo sobre o desenvolvimento das rotas tecnológicas.

3.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associadas aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta: i) as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas; e ii) os fatores portadores de futuro que suportam essa evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

3.3.1. Temática: previsão e planejamento

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Grande e médio porte

As linhas de pesquisas relacionadas à respectiva rota dizem respeito ao desenvolvimento de ferramentas novas e mais precisas para a previsão climática e a caracterização, aos estudos de caracterização do potencial eólico *off-shore* e aos estudos para a caracterização dos ventos *off-shore*. Ver Gráfico 11.

Rota - Pequeno porte

Estudo para a caracterização do recurso eólico no contexto da geração distribuída, sendo considerados os estudos de despacho. Ver Gráfico 12.

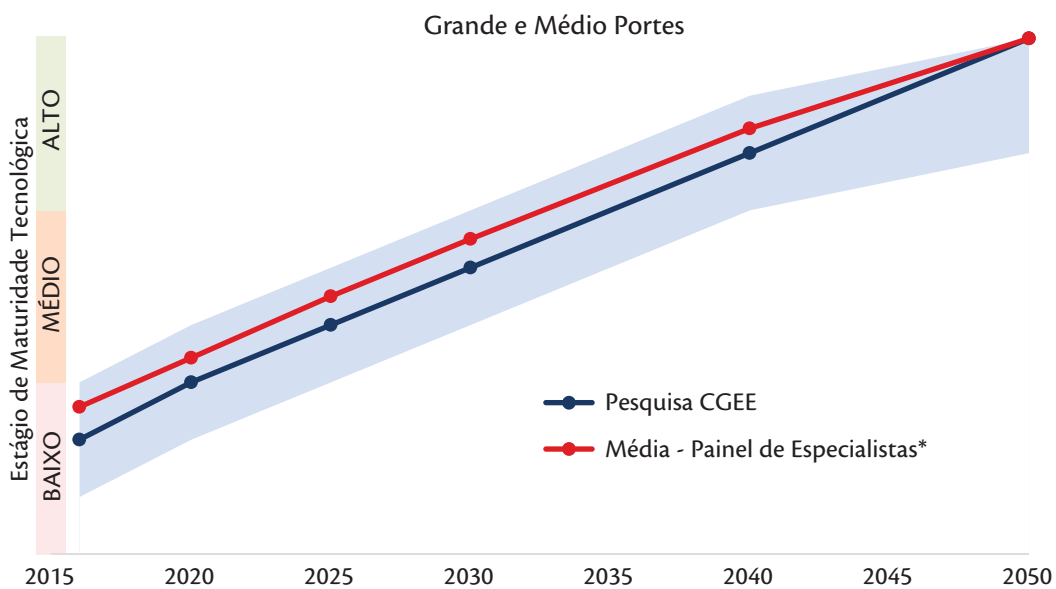


Gráfico 11 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Grande e Médio Portes da temática Previsão e Planejamento

Fonte: Elaboração própria.

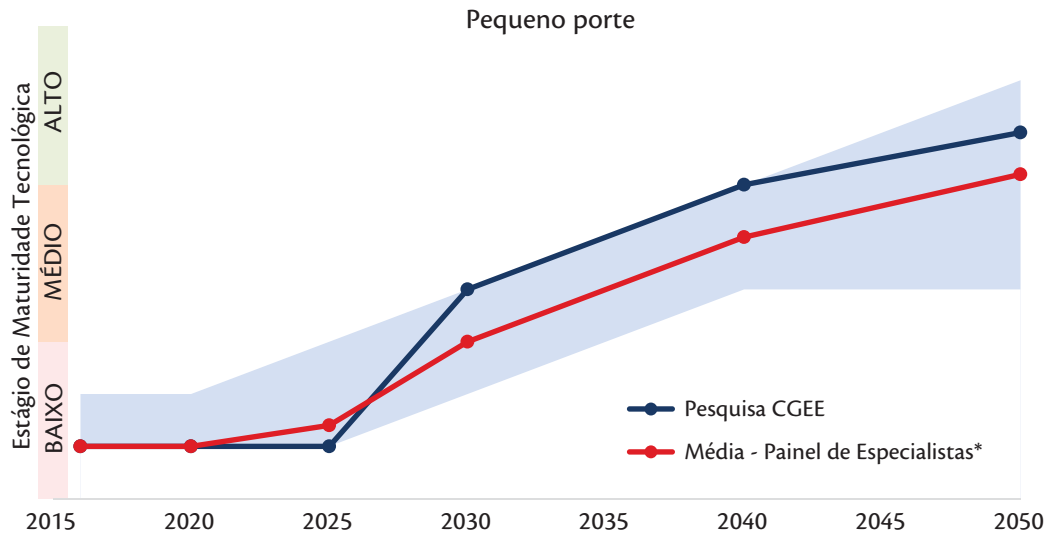


Gráfico 12 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Pequeno Porte da temática Previsão e Planejamento

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Grande e Médio Portes e Pequeno Porte

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Previsão e planeamento	Grande e médio portes	Fatores portadores de futuro	CT&I repotenciada, estudo dos recursos eólicos	Mapa dos recursos eólicos consolidados	Ferramentas de previsão e planeamento em testes	Ferramentas de previsão e planeamento consolidados e operativos	Testados os sistemas de previsão de planeamento	Implantação dos sistemas de previsão e planeamento Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Pequeno porte	Fatores portadores de futuro	CT&I e cadeia produtiva desenvolvidas Tecnologias de caracterização e de mapeamento do recurso eólico em desenvolvimento	Tecnologias de caracterização e mapeamento do recurso eólico em desenvolvimento	Tecnologias de caracterização e mapeamento do recurso eólico em desenvolvimento	Mapa dos recursos eólicos consolidados	Ferramentas de previsão e de planeamento em testes	Implantação dos sistemas de previsão e de planeamento Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO			

Fonte: Elaboração própria.



3.3.2. Temática: implantação, manutenção e descomissionamento

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas (ver Gráfico 13 e Gráfico 14).

Rota – grande porte e médio e pequeno porte

As pesquisas relacionadas à evolução de maturidade das respectivas rotas dizem respeito ao desenvolvimento de novas tecnologias de modais, montagem, descomissionamento e descarte, e também às novas técnicas de construção civil.

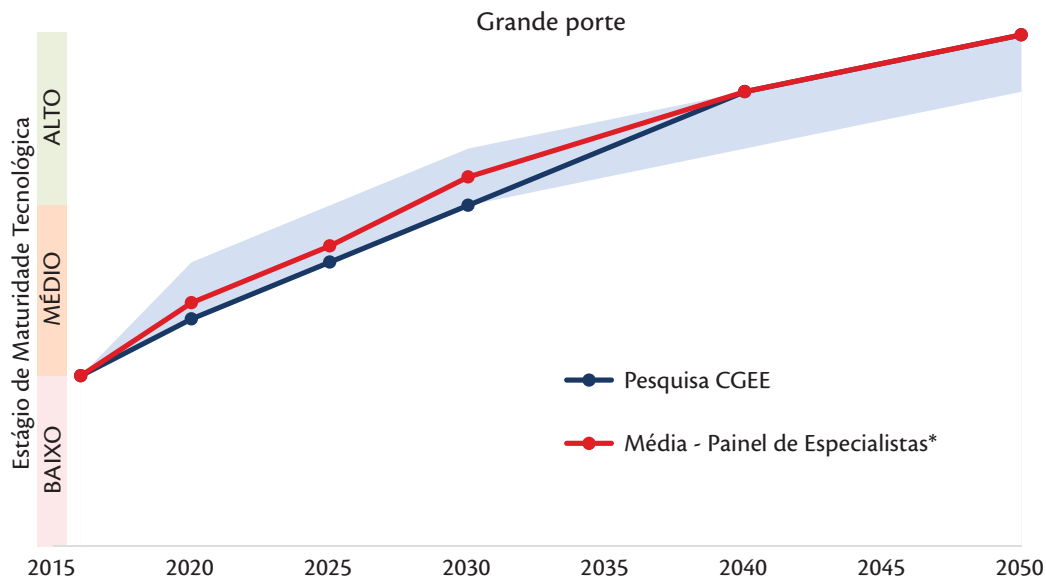


Gráfico 13 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Grande Porte da temática Implantação, Manutenção e Descomissionamento

Fonte: Elaboração própria.

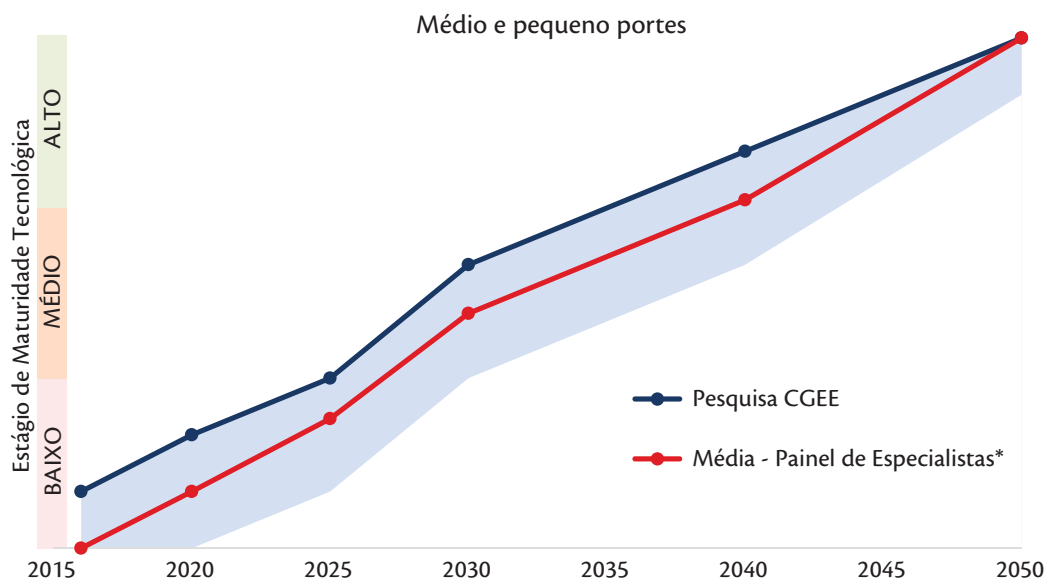


Gráfico 14 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Médio e Pequeno Portes da temática Implantação, Manutenção e Descomissionamento

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 8.



Tabela 8 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Grande Porte e Médio e Pequeno Portes

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Implantação, manutenção e descomissionamento	Grande porte	Fatores portadores de futuro	Planejamento da operação e desenvolvimento de tecnologias de implantação, O&M e monitoramento	Tecnologias de integração entre fontes e sistemas de armazenamento desenvolvidos	Desenvolvimento de tecnologias de descomissionamento	Protocolos de comunicação e monitoramento desenvolvidos	Tecnologias de implantação desenvolvidas	Protocolo de operação fundamentado e ativo. Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação
		Maturidade	MÉDIO				ALTO	
	Médio e pequeno portes	Fatores portadores de futuro	Estudo do recurso eólico, tecnologias iniciais de implantação	Desenvolvimento de estratégias para a implantação da fonte eólica em ambiente GD	Testes em laboratório de sistemas de implantação e manutenção	Aprovação das simulações do uso das tecnologias de implantação e manutenção	Desenvolvimento de técnicas de descomissionamento em ambiente GD	Protocolo de operação fundamentado e ativo. Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação
		Maturidade	BAIXO			MÉDIO	ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

3.3.3. Temática: monitoramento e operação

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade tecnológica das rotas tecnológicas (ver Gráfico 15, Gráfico 16 e Gráfico 17).

Rota – grande porte e médio porte

As pesquisas relacionadas à evolução de maturidade das respectivas rotas dizem respeito ao desenvolvimento de tecnologias para controle, diagnóstico, proteção e comunicação.

Rota - pequeno porte

A evolução da maturidade tecnológica dessa rota relaciona-se ao desenvolvimento e à implantação de turbinas inteligentes (monitoramento e operação por meio de tecnologias do tipo IA).

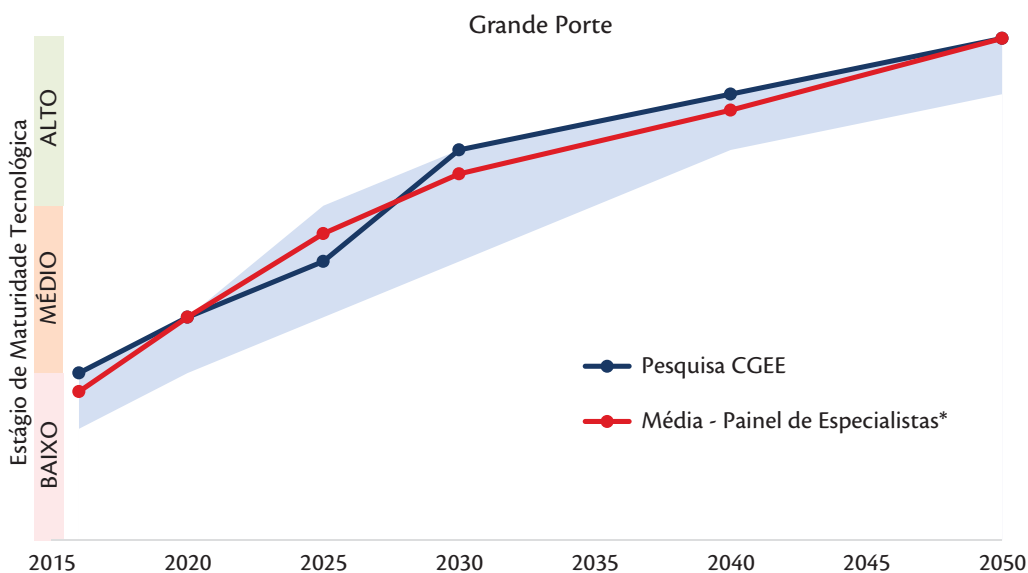


Gráfico 15 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Grande Porte da temática Monitoramento e Operação

Fonte: Elaboração própria.

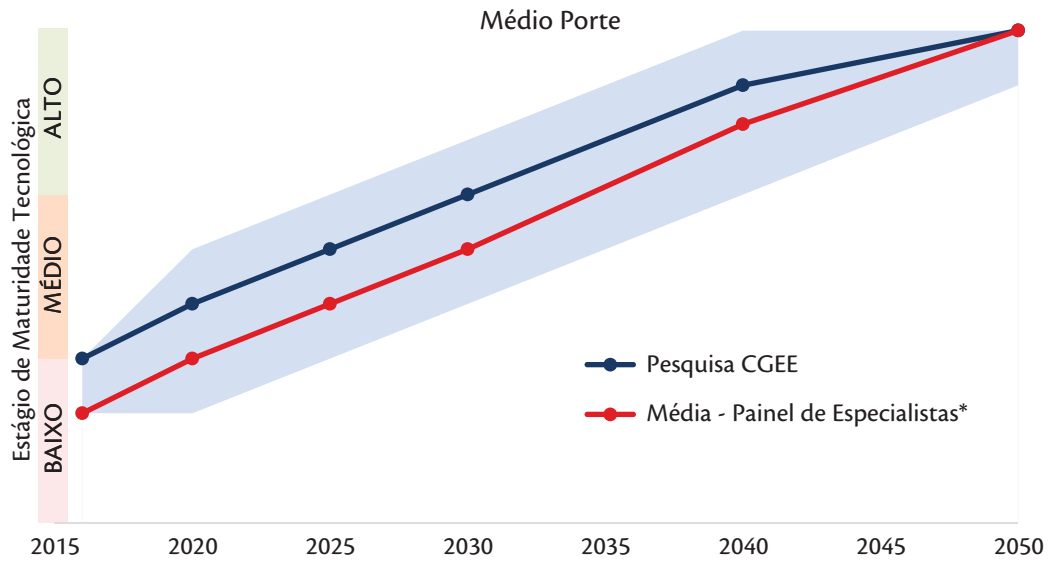


Gráfico 16 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Médio Porte da temática Monitoramento e Operação

Fonte: Elaboração própria.

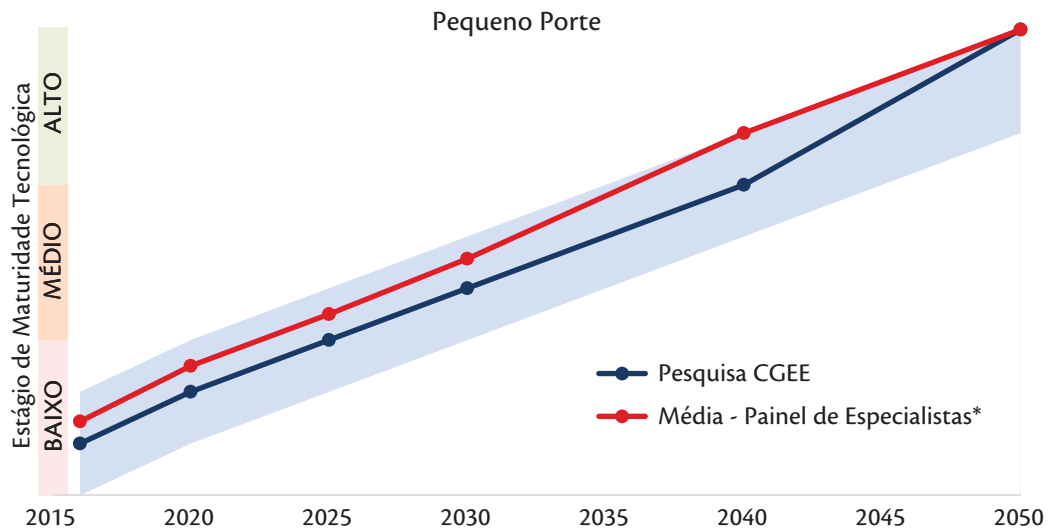


Gráfico 17 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Pequeno Porte da temática Monitoramento e Operação

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Grande Porte, Médio e Pequeno Porte

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Monitoramento e operação	Grande porte	Fatores portadores de futuro	Mapeamento do recurso eólico e protocolo de operação do sistema fundamentados	Desenvolvimento de protótipos em escala laboratorial de sistemas de monitoramento	Implementação de sistemas de monitoramento em aerogeradores de escala operacional	Definição dos protocolos e tecnologias de monitoramento	Definição dos protocolos de operação do sistema com eólica de grande porte	Sistemas de monitoramento e de protocolos de operação implementados
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Médio porte	Fatores portadores de futuro	Estudo do recurso eólico	Caracterização completa dos ventos brasileiros	Desenvolvimento de protótipos em escala laboratorial de sistemas de monitoramento	Definição dos protocolos e tecnologias de monitoramento	Definição dos protocolos de operação do sistema com eólica de grande porte	Sistemas de monitoramento e protocolos de operação implementados
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Pequeno porte	Fatores portadores de futuro	Estudo do recurso eólico	Caracterização completa dos ventos brasileiros	Desenvolvimento de protótipos em escala laboratorial de sistemas de monitoramento	Desenvolvimento de sistemas de monitoramento e operação em GD e isolados	Sistemas de monitoramento implantados em ambiente GD e isolados, com foco em experimentações	Sistemas de monitoramento e protocolos de operação consolidados no contexto GD e isolados Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.



3.3.4. Temática: equipamentos e sistemas

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução maturidade das rotas tecnológicas (ver Gráfico 18, Gráfico 19 e Gráfico 20).

Rota – grande porte e médio porte

As pesquisas relacionadas à evolução de maturidade das respectivas rotas dizem respeito à obtenção de novos materiais que permitam o desenvolvimento de rotores (configuração de pás e sistema de *pitch*) e torres maiores, com novos desenhos (DNA próprio da aplicação), e *nacelles* mais leves (incluindo tecnologias novas como o multiplicador de velocidade).

Rota – pequeno porte

Nesse contexto, as pesquisas relacionadas dizem respeito ao desenvolvimento de modelos de aerogeradores adaptáveis às diversas condições de operação em pequeno porte (GD e sistemas isolados, por exemplo).

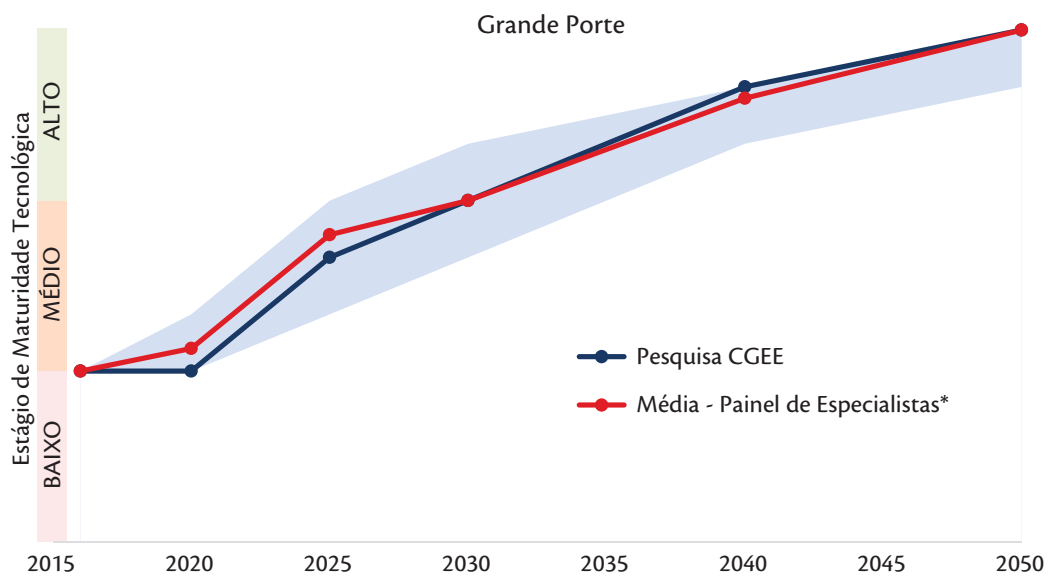


Gráfico 18 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Grande Porte da temática Equipamentos e Sistemas
 Fonte: Elaboração própria.

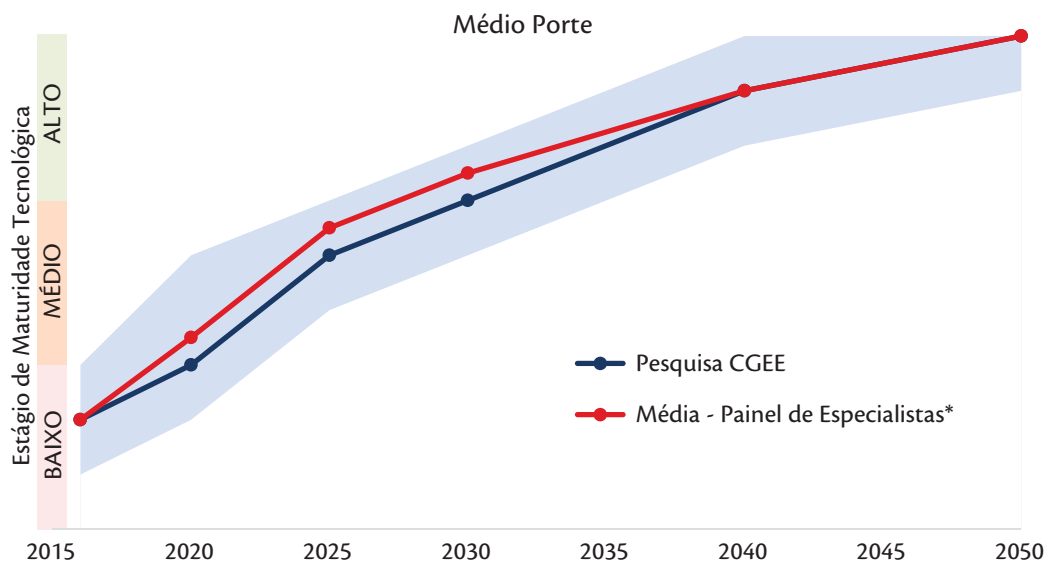


Gráfico 19 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Médio Porte da temática Equipamentos e Sistemas
 Fonte: Elaboração própria.

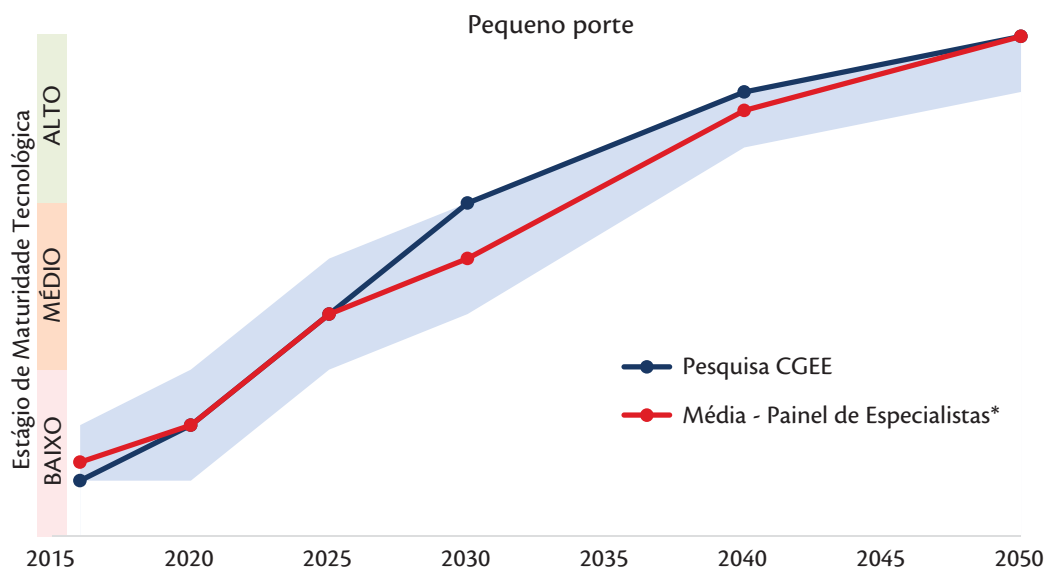


Gráfico 20 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Pequeno Porte da temática Equipamentos e Sistemas

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Grande Porte, Médio e Pequeno Portes

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Equipamentos e sistemas	Grande porte	Fatores portadores de futuro	Fomento ao desenvolvimento de tecnologia nacional, repotenciação da cadeia produtiva e da cadeia de CT&I, desenvolvimento de novos desenhos de rotores e estudos sobre novos materiais	Consolidação de novos desenhos de pás e rotores, seleção de novos materiais e testes iniciais de resistência	Desenvolvimento de estratégias e tecnologias de montagem de aerogeradores e logística, montagem de protótipos em escala real e implantação de sistemas de O&M e integração entre fontes	Análise dos resultados observados em testes em protótipos, definição da operação e caracterização dos sistemas de armazenamento e das tecnologias de integração entre fontes	Definição das áreas dos parques eólicos, ligação com a rede e sistemas de armazenamento, novos protocolos de teste em comissionamento	Tecnologias de implantação e comissionamento desenvolvidas Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Médio porte	Fatores portadores de futuro	Fomento ao desenvolvimento de tecnologia nacional, repotenciação da cadeia produtiva e da cadeia de CT&I, desenvolvimento de novos desenhos de rotores e estudos sobre novos materiais	Consolidação de novos desenhos de pás e rotores, seleção de novos materiais e testes iniciais de resistência	Desenvolvimento de estratégias e tecnologias de montagem de aerogeradores e logística, montagem de protótipos em escala real e implantação de sistemas de O&M e integração entre fontes	Análise dos resultados observados em testes em protótipos, definição da operação e caracterização dos sistemas de armazenamento e das tecnologias de integração entre fontes	Definição das áreas dos parques eólicos, ligação com a rede e sistemas de armazenamento, novos protocolos de teste em comissionamento	Tecnologias de implantação e de comissionamento desenvolvidas Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Pequeno porte	Fatores portadores de futuro	Fomento ao desenvolvimento de tecnologia nacional, repotenciação da cadeia produtiva e da cadeia de CT&I, desenvolvimento de novos desenhos de rotores e estudos sobre novos materiais	Consolidação de novos desenhos de pás e rotores, seleção de novos materiais e testes iniciais de resistência, desenvolvimento da GD	Desenvolvimento de microrredes e sistemas de integração entre fontes e entre sistemas de armazenamento	Desenvolvimento de sistemas de implantação e logística	Desenvolvimento dos sistemas de operação e monitoramento no ambiente GD	Tecnologias de implantação e comissionamento desenvolvidas Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.



3.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro.

Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Grande e médio portes	Previsão e planejamento
2	Médio porte	Monitoramento e operação
3	Médio porte	Equipamentos e sistemas
4	Grande porte	Monitoramento e operação
5	Médio e pequeno portes	Implantação, manutenção e descomissionamento
6	Grande porte	Equipamentos e sistemas
7	Pequeno porte	Monitoramento e operação
8	Pequeno porte	Previsão e planejamento
9	Pequeno porte	Equipamentos e sistemas
10	Grande porte	Implantação, manutenção e descomissionamento

Fonte: Elaboração própria.

Para que haja o desenvolvimento das tecnologias abordadas na macrotemática, é necessário mapear as características dos ventos nacionais. O desenho das pás, *nacelle* e torres depende da configuração do escoamento local para que o aerogerador tenha o melhor desempenho (maior eficiência no aproveitamento da energia cinética dos ventos).

As tecnologias de monitoramento e de operação de parques eólicos precisam estar maduras para garantirem o uso eficiente dos aerogeradores atuais e das novas turbinas eólicas, tanto na condição de funcionamento, quanto na condição de operação dos parques no sistema interligado.

As tecnologias de aerogeradores de grande e médio portes são consideradas maduras. Porém, há diversos desenvolvimentos que devem ser feitos, por dois motivos: i) melhorar a performance dos equipamentos do aerogerador; e ii) desenvolver tecnologia nacional, com DNA próprio (ou seja, turbinas específicas para grande porte - *on-shore* e *off-shore* - e para médio e pequeno portes) e com tecnologias que possam competir no mercado externo. Neste contexto, espera-se, principalmente, o desenvolvimento de novos materiais, conforme mencionado.



Capítulo 4



Capítulo 4

Macrotemática Energia Solar Fotovoltaica

A expansão da demanda por energia elétrica em praticamente todos os setores e a necessidade de diversificar a matriz elétrica devido a condicionantes ambientais e estratégicos são fatores que intensificarão a participação das fontes renováveis na geração de eletricidade. Neste contexto, a geração fotovoltaica terá papel fundamental no setor elétrico, sendo em especial responsável pela disseminação em grande escala da geração distribuída.

Para tanto, as tecnologias responsáveis por mitigar a intermitência dessa fonte devem evoluir paralelamente ao crescimento da utilização de sistemas de armazenamento de energia, seja para usos relacionados à gestão ativa da demanda, com foco na geração distribuída, seja para o controle e a operação do sistema elétrico.

Ademais, o crescimento destacado do setor de serviços na economia até o horizonte de 2050 indica que investimentos em PD&I devem ser direcionados a temas ligados ao projeto, dimensionamento, funcionamento, instalação, desempenho, operação, manutenção e integração à rede de sistemas fotovoltaicos. Isso não significa que não se deva dedicar investimentos para o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de equipamentos e componentes, porém, neste caso, deve-se priorizar os nichos em que o País possa se destacar no mercado, por exemplo, itens de BoS e novas tecnologias de conversão, as quais não possuem atualmente um mercado definido.

Em vista disso, neste documento foi considerada a estrutura apresentada na Figura 10, sobre a qual serão direcionadas as considerações feitas neste trabalho.

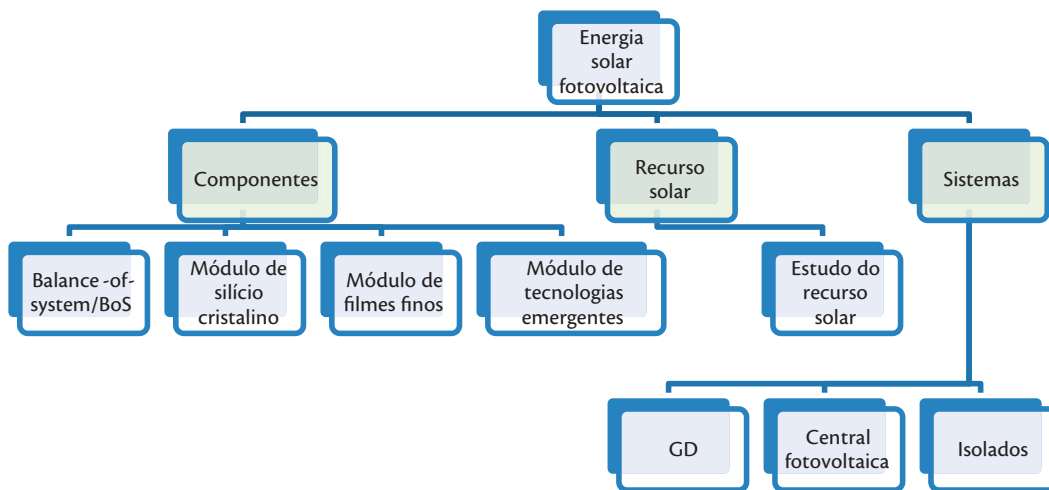


Figura 10 - Caracterização da macrotemática Energia Solar Fotovoltaica (preenchimento na cor verde; temáticas; abaixo; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.

4.1. Visão de futuro

4.1.1. Cenário setorial

A evolução da demanda de energia elétrica até 2050 deve exigir algo entre 400 GW e 480 GW em capacidade instalada no SIN. Este cenário trará desafios como a diversificação e a ampliação do parque gerador para atender à demanda esperada. Neste contexto, a energia solar, em particular o aproveitamento via efeito fotovoltaico, terá uma participação significativa na matriz elétrica, seguindo a atual tendência de mercado, na qual a macrotemática Solar Fotovoltaica adquire cada vez mais competitividade.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a instalação de grandes centrais fotovoltaicas será impulsionada pelas metas de *Nationally Determined Contributions* (NDC) brasileiras, de maior participação de fontes renováveis não convencionais, até 2030. A redução dos custos de instalação e de O&M durante essa fase proporcionará elevada competitividade para a geração fotovoltaica no mercado de energia elétrica.



Além disso, considerando-se que o crescimento econômico previsto para as próximas décadas será mais forte no setor de serviços, cuja curva de carga possui forte correlação com a curva de geração fotovoltaica, e que as tecnologias de armazenamento de energia se tornarão cada vez mais atrativas técnica e economicamente, a geração distribuída baseada em sistemas fotovoltaicos nos setores residencial e comercial também terá um crescimento significativo, podendo superar os 4,5 GW até 2025.

4.1.2. Objetivo geral

Os investimentos em PD&I deverão focar no desenvolvimento nacional de componentes e equipamentos, em particular em tecnologias relacionadas ao BoS; em melhoramento dos processos produtivos e de controle de qualidade pré e pós-operacionais; e em tecnologias relacionadas à integração com o sistema elétrico e à previsão do uso da fonte.

4.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes, que inclui:

Curto Prazo (2017-2020):

- Desenvolvimento de ferramentas para estimar o potencial fotovoltaico no Brasil;
- Desenvolvimento de técnicas de previsão para fins de operação e de expansão da geração fotovoltaica;
- Desenvolvimento de *Battery Management Systems* (BSM), com células de lithium-ion, associados à geração fotovoltaica;
- Desenvolvimento de tecnologias e de métodos de integração da fonte fotovoltaica com o sistema elétrico, incluindo a operação e o planejamento.

Médio Prazo (2020-2030):

- Aperfeiçoamento de técnicas de previsão de operação e expansão da geração fotovoltaica;
- Desenvolvimento de tecnologias relacionadas ao BoS;
- Desenvolvimento de tecnologias avançadas de processos produtivos, com foco em mitigar custos na produção dos sistemas fotovoltaicos;
- Desenvolvimento de métodos e tecnologias de gestão do sistema fotovoltaico;
- Desenvolvimento de inversores fotovoltaicos adaptados às condições ambientais do Brasil;
- Pesquisa com foco no aumento da eficiência dos sistemas fotovoltaicos;
- Aprimoramento de tecnologias e de métodos de integração da fonte fotovoltaica com o sistema elétrico, incluindo a operação e o planejamento;
- Desenvolvimento de tecnologias do tipo *Building Integrated Photovoltaics* (BIPV) no contexto da GD;
- Tecnologias avançadas para mitigar os efeitos da intermitência da fonte fotovoltaica.

Longo Prazo (2030-2050)

- Desenvolvimento de tecnologias de reciclagem dos componentes do sistema fotovoltaico;
- Desenvolvimento de novos materiais para os elementos dos sistemas fotovoltaicos, com foco em mitigar custos e no aumento da eficiência de conversão da radiação solar em eletricidade, buscando torná-la mais competitiva.

4.1.4. Fundamentação

No que diz respeito aos sistemas fotovoltaicos, a tecnologia dominante na fabricação de células fotovoltaicas continua sendo a *wafer* de silício monocristalino e policristalino (26% e 68% do total, respectivamente - *SPV Market Research* (2016)).

O Brasil possui grandes reservas de silício em território nacional, e, aliado a isso, a cadeia de CT&I nacional tem investido em pesquisas na rota de purificação metalúrgica, abrindo a possibilidade de redução dos custos de produção. Desta forma, seria possível compreender que há vocação nacional para a produção de células fotovoltaicas de silício cristalino.



No entanto, a necessidade de vultosos investimentos para a produção do silício de alta pureza em um mercado mundial comoditizado e oligopolizado e a existência de outras tecnologias promissoras de segunda (ex.: filmes finos de telureto de cádmio - CdTe) e de terceira gerações (ex.: células orgânicas, perovskitas etc.) levam à conclusão de que muito mais do que investir na produção de silício em um mercado extremamente competitivo e de baixa (e decrescente) margem, mais efetivo seria o estímulo ao investimento em PD&I voltado ao estabelecimento de um mercado fotovoltaico no Brasil, e que contemple os demais componentes do sistema (BoS) e os temas de integração à rede elétrica e de utilização de armazenamento de energia, em que as margens são crescentes e existe muito mais competência nacional em CT&I e potencial de ganho. A redução do peso do módulo fotovoltaico na distribuição de custos de um sistema solar fotovoltaico reforça o investimento prioritário em rotas não relacionadas aos módulos fotovoltaicos (BSW Solar (2016)).

Um exemplo do risco associado ao estabelecimento de uma indústria nacional de produção de células fotovoltaicas com base no silício cristalino pode ser inferido do mercado fotovoltaico mundial ao final de 2016, quando, em função de uma alteração na política de incentivo ao mercado fotovoltaico chinês, o mercado mundial se viu imediatamente infestado por um grande estoque de módulos fotovoltaicos que forçaram os preços (CIF Rio de Janeiro) para a cifra de 0,30 US\$/Wp, enquanto que o único fabricante de módulos fotovoltaicos em operação no Brasil no mesmo período informou que seu custo de produção (e não preço CIF Rio de Janeiro) estava ao redor de 0,70 US\$/Wp.

No que diz respeito à cadeia produtiva, o Brasil ainda não possui um parque tecnológico e industrial para refinar o silício para grau solar ou para produzir as células fotovoltaicas e, a partir delas, os módulos fotovoltaicos. Por isso, e também por não ter um mercado interno grande o suficiente para atrair diversas indústrias de porte do setor, entre outros motivos, o País importa a maioria dos módulos fotovoltaicos e inversores que são aqui instalados (é importante destacar que, mesmo em pequena escala, já há produção nacional de ambos). Atualmente, há um grande número de empresas brasileiras que representam e/ou distribuem módulos e outros componentes importados, assim como empresas de comercialização, instalação e manutenção.²⁶ Cabe informar que o interesse de grupos empresariais pela cadeia produtiva de sistemas fotovoltaicos tem aumentado no Brasil, dada a possibilidade de crescimento na matriz elétrica nacional, em particular nos elos de Componentes e Serviços da cadeia produtiva apresentada na Figura 11.

Na cadeia produtiva brasileira, é possível observar a predominância de empresas estrangeiras na purificação do silício e na fabricação das células fotovoltaicas (ver Figura 11). Embora haja interesse

26 O site América do Sol disponibiliza um mapa interativo continuamente atualizado com a localização e os contatos das empresas do setor fotovoltaico que atuam no Brasil: <http://www.americadosol.org/fornecedores/>.

no desenvolvimento desses elos da cadeia produtiva no Brasil, em especial devido aos requisitos de financiamento do Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES), convém priorizar os investimentos de PD&I nos elos de Componentes e Serviços da cadeia produtiva, pois, como explicado anteriormente, são as áreas com a maior vocação nacional e chances de sucesso.

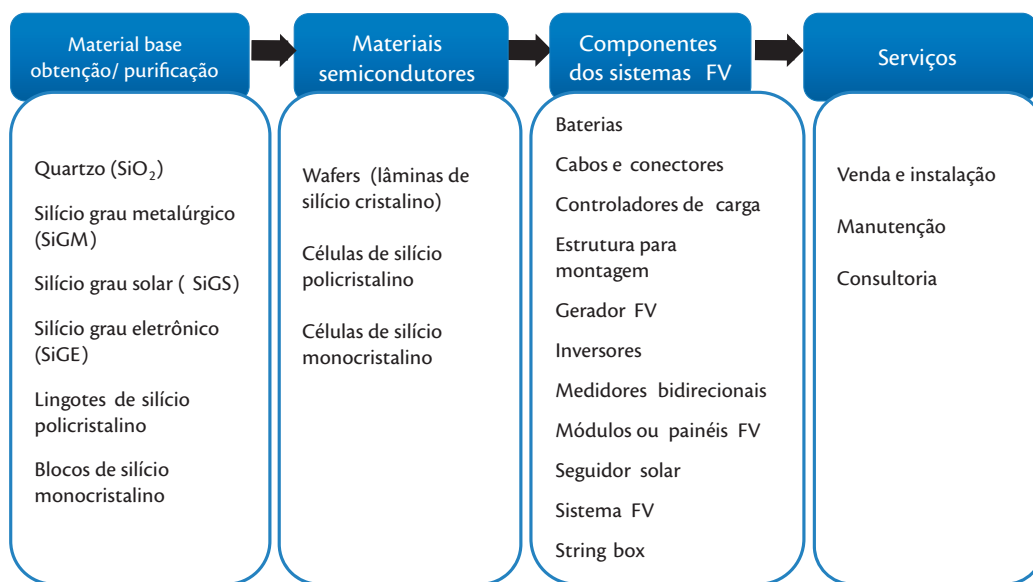


Figura 11 - Cadeia produtiva da geração fotovoltaica com base no silício. As etapas de Componentes e Serviços são independentes do tipo de célula fotovoltaica e se aplicam da mesma forma aos filmes finos, células orgânicas etc.

Fonte: Elaboração própria.

No contexto nacional, observam-se inúmeras linhas promissoras de PD&I, voltadas, principalmente, a estudos de desenvolvimento de novas técnicas de fabricação, para aumentar o desempenho dos sistemas fotovoltaicos, de integração com a rede elétrica, dedicados à melhoria dos sistemas de seguimento solar, de armazenamento de energia, de aumento da eficiência de conversores e de aprimoramento de O&M. Vários grupos de pesquisa atuam ativamente nessas linhas de PD&I, com:

- Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) da Eletrobrás;²⁷
- Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPqD);²⁸

²⁷ <http://www.cepel.br/>

²⁸ <https://www.cpqd.com.br/>



- Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (Gedae), da Universidade Federal do Pará (UFPA);²⁹
- Grupo de Estudos em Energia (Green), do Instituto Politécnico da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG);³⁰
- Grupo de Pesquisa Estratégica em Energia Solar (Fotovoltaica), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC);³¹
- Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia (Grupo FAE), do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE);³²
- Laboratório de Energia Solar (Labsolar), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS);³³
- Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF), do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (USP);³⁴
- Núcleo de Tecnologia em Energia Solar (NT-Solar,) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUC-RS).³⁵

As diretrizes para PD&I focam o mercado interno, visto que há grande concorrência de empresas estrangeiras operando no mercado internacional e o mercado interno é promissor e possui expectativa de rápido crescimento para os próximos anos.

As linhas de PD&I foram divididas em oito rotas tecnológicas, a saber:

- Módulos de silício cristalino (temática Componentes);
- Módulos de filmes finos (temática Componentes);
- Módulos de tecnologias emergentes (temática Componentes);
- BoS (temática Componentes);
- Recurso solar (temática Recurso Solar);

29 <http://www.gedae.ufpa.br/>

30 http://portal.pucminas.br/green/index_padrao.php?pagina=3428

31 <http://fotovoltaica.ufsc.br/>

32 <https://www.ufpe.br/grupofae/oqueefae.htm#3>

33 <http://www.solar.ufrgs.br/>

34 <http://lsf.iee.usp.br/>

35 <http://www.pucrs.br/cbsolar/capa.php>

- Geração distribuída (GD) (temática Sistemas);
- Centrais fotovoltaicas (temática Sistemas);
- Isolados (temática Sistemas).

4.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática energia solar fotovoltaica foi caracterizado em resposta a um conjunto de métricas (ver Anexo) que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo, levando-se em conta o período de tempo até 2050.

As métricas voltadas para a evolução tecnológica dizem respeito:

- Ao aumento de eficiência dos sistemas fotovoltaicos: caracteriza o nível de eficiência dos sistemas fotovoltaicos ao longo do período considerado. No contexto geral (macrotemática), o respectivo aumento de eficiência precisa ser contínuo, ao longo dos anos.
- Desenvolvimento nacional: informa sobre a necessidade de desenvolver sistemas fotovoltaicos no Brasil. Também, no contexto da macrotemática, é apresentado que essa questão deve ser contínua ao longo do período considerado.
- Desempenho médio: caracteriza o nível percentual de confiabilidade esperada dos sistemas fotovoltaicos, ao longo do período considerado. De forma geral, estima-se que em 2050 os sistemas fotovoltaicos mantenham aproximadamente 85% da sua confiabilidade.
- Nível de automação de diagnóstico de O&M: indica a maturidade tecnológica dos sistemas de automação de diagnóstico da tecnologia fotovoltaica. No âmbito da macrotemática, o nível de automação em 2050 deve ser considerado elevado para os padrões atuais.
- Vida útil (redução de 20% da potência útil nominal): caracteriza o tempo de operação dos sistemas fotovoltaicos, considerando-se os níveis de confiabilidade apresentados em outro indicador. Quanto à macrotemática, estima-se que a vida útil dos sistemas fotovoltaicos deva alcançar os 40 anos de funcionamento confiável em 2050.
- Maturidade da previsão: diz respeito à precisão dos dados de previsão do recurso solar. Em 2050, estima-se que as tecnologias dedicadas à previsão do recurso tenham elevada maturidade.
- Robustez à intermitência: caracteriza o nível tecnológico dos sistemas responsáveis por mitigar a intermitência da fonte, na resposta com a geração de eletricidade. Estima-se que



os sistemas fotovoltaicos, de uma forma em geral, apresentem elevado nível de robustez à intermitência, até 2050.

- Integração com sistemas de armazenamento de energia: indica o nível de associação tecnológica entre os sistemas fotovoltaicos e os sistemas de armazenamento de energia, no período considerado. No contexto da macrotemática, estima-se que esse nível de integração seja elevado, se comparado com os padrões atuais.

As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado estão caracterizadas na planilha de indicadores, conforme instruções constantes na própria planilha. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias, as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e setor elétrico brasileiro potencializam a melhora ou a participação dessas questões no setor elétrico brasileiro, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

4.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associadas aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta: i) as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas; e ii) os fatores portadores de futuro que suportam essa evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

4.3.1. Temática componentes

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota – Balance of System (BoS)

A otimização ou o aperfeiçoamento de inversores e a mitigação dos custos de produção são os principais fatores que norteiam a evolução da maturidade tecnológica desta rota. Neste aspecto, foram considerados, portanto, o desenvolvimento de novas funcionalidades para os inversores para controlar o despacho da geração distribuída, permitir a integração com redes elétricas inteligentes, elevar a qualidade da energia da rede elétrica e facilitar a operação ilhada com sistemas fotovoltaicos, além de prover serviços ancilares para a rede; e o desenvolvimento de tecnologia nacional de conversores CC/CA, de componentes elétricos, BMS, conversores CC/CC e sistemas de controle; além do desenvolvimento de técnicas de fabricação avançada (melhor eficiência, redução dos custos, redução dos impactos ambientais, reciclável e de elevada vida útil) para equipamentos e componentes (ver Gráfico 21).

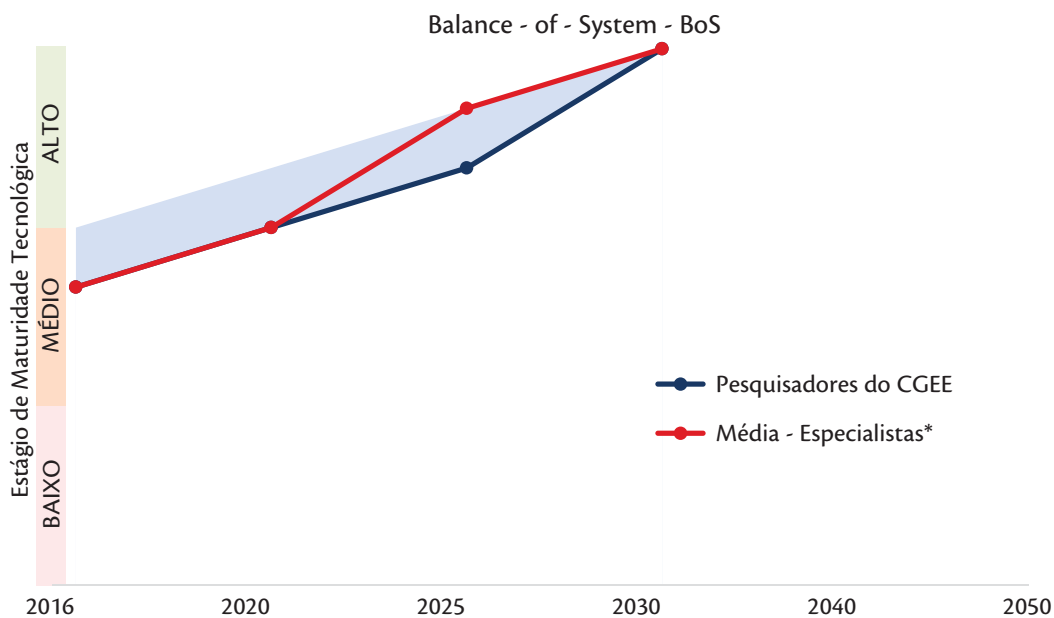


Gráfico 21 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Balance-of-System - BoS

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Módulo de silício cristalino e módulo de filmes finos

Basicamente, a evolução da maturidade destas rotas fundamenta-se no desenvolvimento de técnicas de fabricação avançada (melhor eficiência, redução dos custos, redução dos impactos ambientais,



reciclável e de elevada vida útil) para vidros antirreflexivos, para substratos e para o encapsulamento e a elevação da vida útil do sistema fotovoltaico (considerando a confiabilidade, o descarte e o desenvolvimento nacional). Ver Gráfico 22 e Gráfico 23.

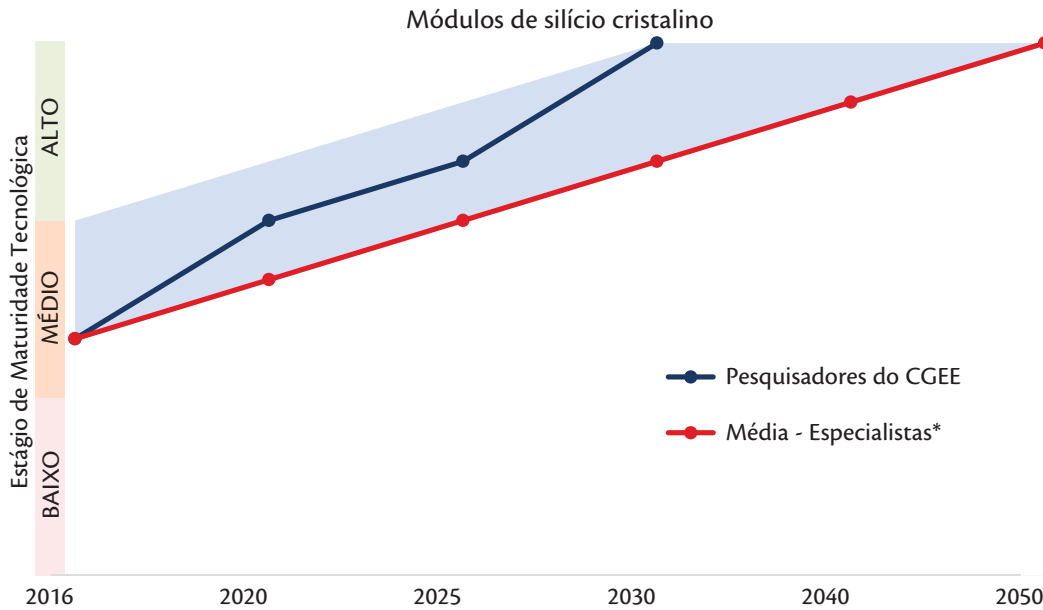


Gráfico 22- Evolução da maturidade tecnológica da rota Módulos de Silício Cristalino

Fonte: Elaboração própria.

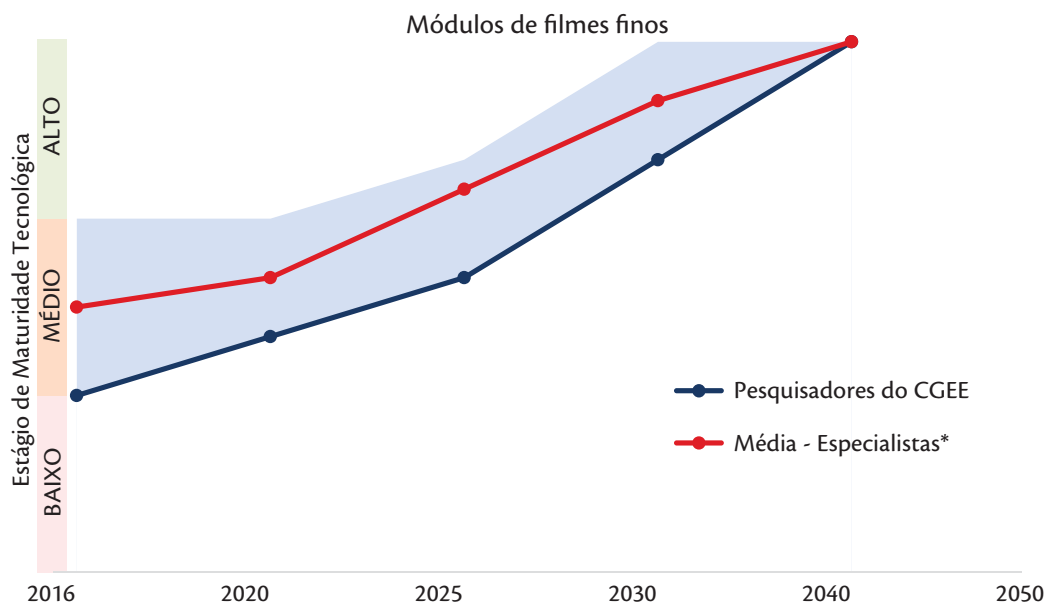


Gráfico 23 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Módulos de Filmes Finos

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Módulos de tecnologias emergentes

A evolução da maturidade tecnológica desta rota fundamenta-se no desenvolvimento de novos materiais, capazes de elevar a eficiência da geração de eletricidade, a custos competitivos e com características de moldabilidade ao ambiente (melhor integração às edificações), a partir de tecnologias que mitiguem as agressões ao meio ambiente, quando do descarte (ver Gráfico 24).

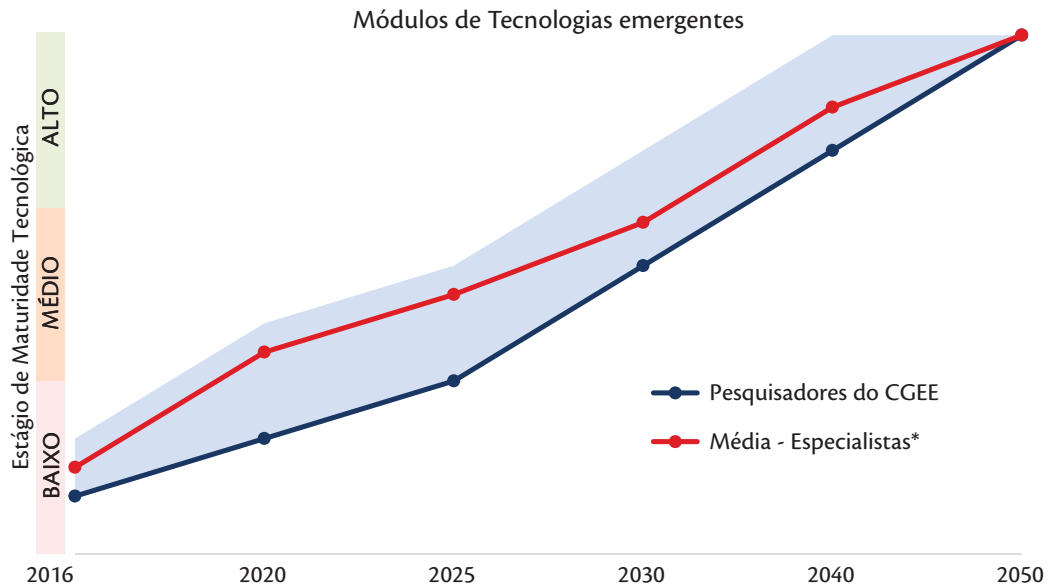


Gráfico 24- Evolução da maturidade tecnológica da rota Módulos de Tecnologias Emergentes

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas BoS, Módulos de Silício Cristalino, Módulos de Filmes Finos e Módulos de Tecnologias Emergentes

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Componentes	Balance-of-system/ BoS	Fatores portadores de futuro	Tecnologia nacional em desenvolvimento	Geração de protótipos para testes em laboratórios	Aplicação de sistemas BoS pilotos em sistemas GD e em usinas fotovoltaicas	Tecnologias implementadas e testadas		
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
	Módulo de silício cristalino	Fatores portadores de futuro	Testes em novos materiais	Estudo com foco no aumento da eficiência do processo de conversão	Desenvolvimento de tecnologias de fabricação dos novos módulos	Testes laboratoriais e validação da tecnologia	Aplicação em sistemas GD e usinas fotovoltaicas para testes e caracterização dos sistemas de integração de fontes e sistemas de armazenamento e implementação da tecnologia Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.	
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
Módulo de filme fino	Fatores portadores de futuro	Estudo com foco no aumento da eficiência do processo de conversão	Desenvolvimento de tecnologias de fabricação dos novos módulos	Testes laboratoriais e validação da tecnologia	Aplicação em sistemas GD e usinas fotovoltaicas para testes e caracterização dos sistemas de integração de fontes e sistemas de armazenamento	Implementação da tecnologia Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação		
	Maturidade	MÉDIO			ALTO			
Módulo de tecnologias emergentes	Fatores portadores de futuro	Estudos prospectivos, avaliação de materiais e nacionalização de conhecimento	Materiais selecionados e em fase de estudos e otimização da cadeia produtiva nacional	Desenvolvimento de tecnologias de fabricação dos novos módulos	Caracterização dos protótipos e testes em laboratório	Implementação em escala real em sistemas GD e usinas de geração fotovoltaica	Implementação da tecnologia Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação	
	Maturidade	BAIXO			MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.



4.3.2. Temática recurso solar

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade da rota tecnológica desta temática.

Rota - Estudo do recurso solar

Nesse contexto, a evolução tecnológica dessa rota tem como base o detalhamento do potencial solar no Brasil (estudo sobre as características e o cálculo das flutuações de irradiância e sobre as características e a frequência de eventos de sobreirradiância) e desenvolvimento de métodos mais precisos para a criação de mapas solarimétricos e para a previsão do recurso solar (ver Gráfico 25).

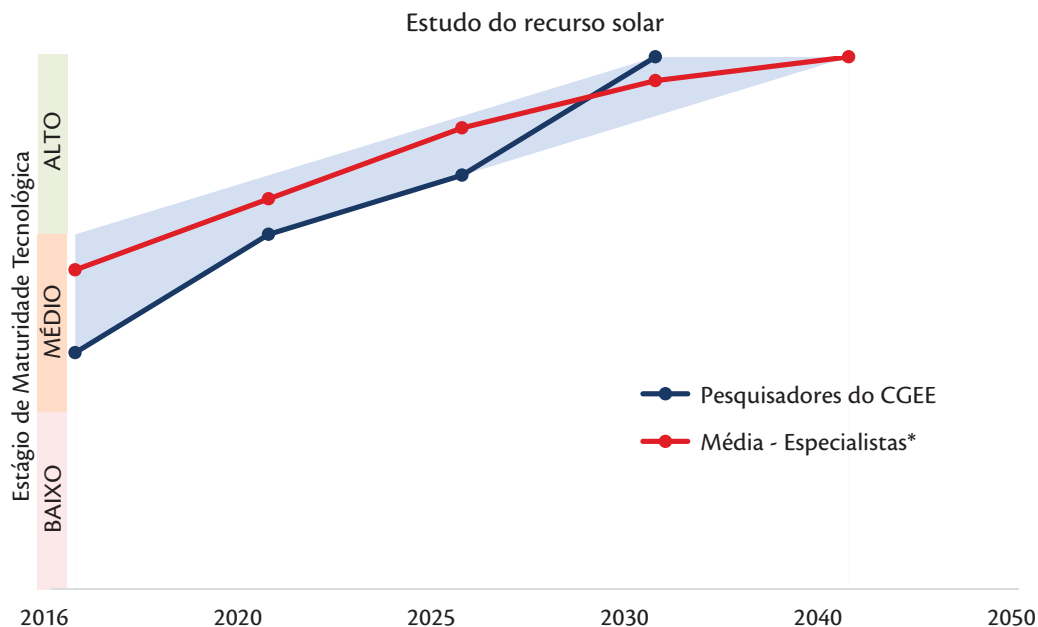


Gráfico 25 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudo do Recurso Solar

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade da respectiva rota são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota Estudo do Recurso Solar

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Recurso solar	Estudo do recurso solar	Fatores portadores de futuro	Metodologias caracterizadas e tecnologias de medição da radiação solar em fase final de desenvolvimento	Tecnologias de medição do recurso solar testadas e homologadas	Planejamento da operação solar fotovoltaica em desenvolvimento	Mapa solarimétrico e protocolos de operação dos sistemas testados Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota		

Fonte: Elaboração própria.

4.3.3. Temática sistemas

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Geração distribuída

As linhas de pesquisa que estão relacionadas ao desenvolvimento da respectiva rota dizem respeito ao estudo do gerenciamento da geração distribuída fotovoltaica, com ou sem bateria, incluindo previsão da geração e sendo consideradas as tecnologias de automação do sistema com Inteligência Artificial (IA). Ver Gráfico 26.

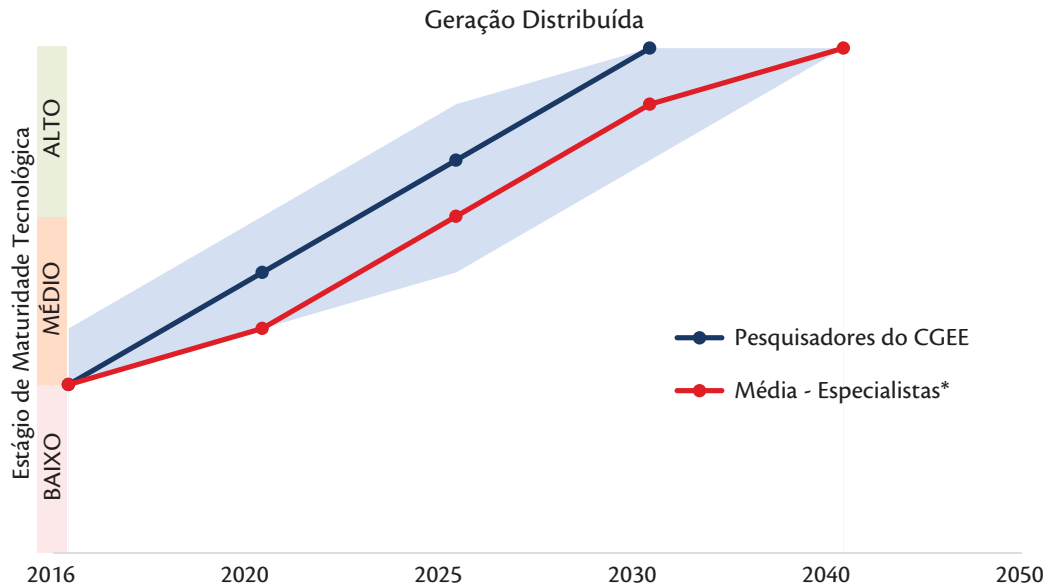


Gráfico 26 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Distribuída

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Central fotovoltaica

Nesse contexto, as linhas dizem respeito ao desenvolvimento de tecnologias de monitoramento, tomada de decisão e gerenciamento de ativos. Incluem-se as tecnologias de integração de fontes energéticas (ver Gráfico 27).

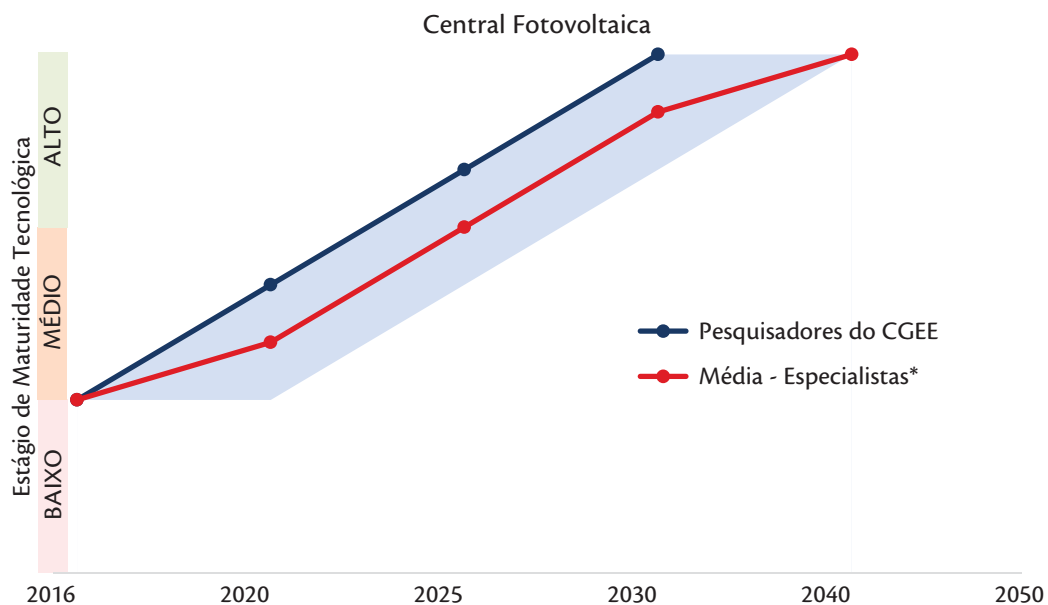


Gráfico 27 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Central Fotovoltaica

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Sistemas isolados

Estudo sobre a integração de sistemas fotovoltaicos em sistemas híbridos e minirredes e desenvolvimento e melhoramento de sistemas fotovoltaicos isolados, com ou sem bateria, para atendimento das demandas locais, como frio e calor e bombeamento de água (ver Gráfico 28).

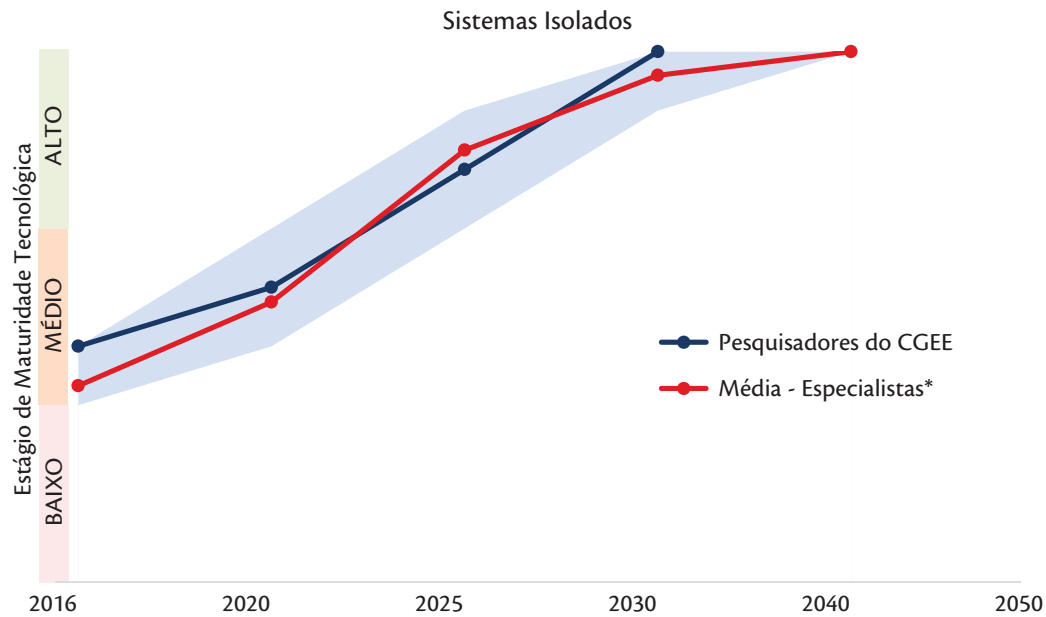


Gráfico 28 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas Isolados

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas GD, Central Fotovoltaica e Isolados

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Sistemas	GD	Fatores portadores de futuro	Desenvolvimento da GD e dos sistemas de microrredes	Caracterização dos sistemas de geração distribuída	Protocolo de implementação e de testes dos sistemas fotovoltaicos na GD	Protocolo de análise dos resultados finalizado. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.		
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			
	Central fotovoltaica	Fatores portadores de futuro	Tecnologias de integração entre sistemas fotovoltaicos, O&M, monitoramento em fase de desenvolvimento.	Protótipo de tecnologias de integração entre sistemas fotovoltaicos, O&M, monitoramento em operação real para testes.	Protocolo de implementação e de testes dos sistemas fotovoltaicos	Protocolo de análise dos resultados finalizado. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.		
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			
	Isolados	Fatores portadores de futuro	Tecnologias de integração entre sistemas fotovoltaicos, O&M, monitoramento em fase de desenvolvimento.	Protótipo de tecnologias de integração entre fontes, O&M, monitoramento em operação real para testes.	Protocolo de implementação e de testes dos sistemas fotovoltaicos e híbridos definidos	Protocolo de análise dos resultados finalizado. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.	Fomento ao desenvolvimento contínuo da rota	
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			

Fonte: Elaboração própria.



4.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro. Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas conforme apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	BoS	Componentes
2	Recurso solar	Recurso solar
3	Geração distribuída	Sistemas
4	Centrais fotovoltaicas	Sistemas
5	Isolados	Sistemas
6	Módulos de silício cristalino	Componentes
7	Módulos de tecnologias emergentes	Componentes
8	Módulos de filmes finos	Componentes

Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se que a maior prioridade é dada à rota BoS da Temática Componentes, pois o País possui grande potencial para desenvolver inversores e demais componentes como estruturas de suporte, cabos, quadros etc., que, juntos, representam mais de um terço do investimento inicial.

A segunda prioridade é para o estudo do recurso solar, pois dele dependem diversos outros temas, e conhecer as particularidades do País em termos de potencial e variabilidade é de fundamental importância.

Em seguida, a prioridade é dada aos estudos de sistemas, sendo a diferença de classificação no *ranking* de prioridades apenas ilustrativa, tendo em vista que as importâncias das três rotas tecnológicas são equiparáveis.

As três últimas posições são ocupadas pelas rotas tecnológicas de módulos fotovoltaicos, fato que se deve particularmente ao cenário internacional competitivo nessa área.



Capítulo 5



Capítulo 5

Macrotemática Energia Solar Heliotérmica

A tecnologia de geração solar heliotérmica (*Concentrated Solar Power - CSP*) se apresenta como uma tecnologia em desenvolvimento e sem grande crescimento no cenário energético mundial até o presente momento. O potencial de geração de eletricidade a partir de CSP no mundo é de 500 GW (TRIEB *et al.*, 2009), sendo que a capacidade instalada em 2014 foi de pouco mais de 4300 MW. Problemas econômicos e operacionais mantêm essa tecnologia no mesmo estágio de desenvolvimento desde a década de 1980. Contudo, não significa que não se deva investir em pesquisa e em desenvolvimento nessa área.

A disponibilidade do recurso solar no Brasil, a baixa maturidade dessa tecnologia em solo nacional e a possibilidade da integração dessa fonte em sistemas do tipo GD e em regiões remotas fazem desta macrotemática um nicho para o desenvolvimento nacional de tecnologias.

Considerando-se este cenário, os nichos de investimentos na tecnologia da macrotemática estão apresentados na Figura 12 .

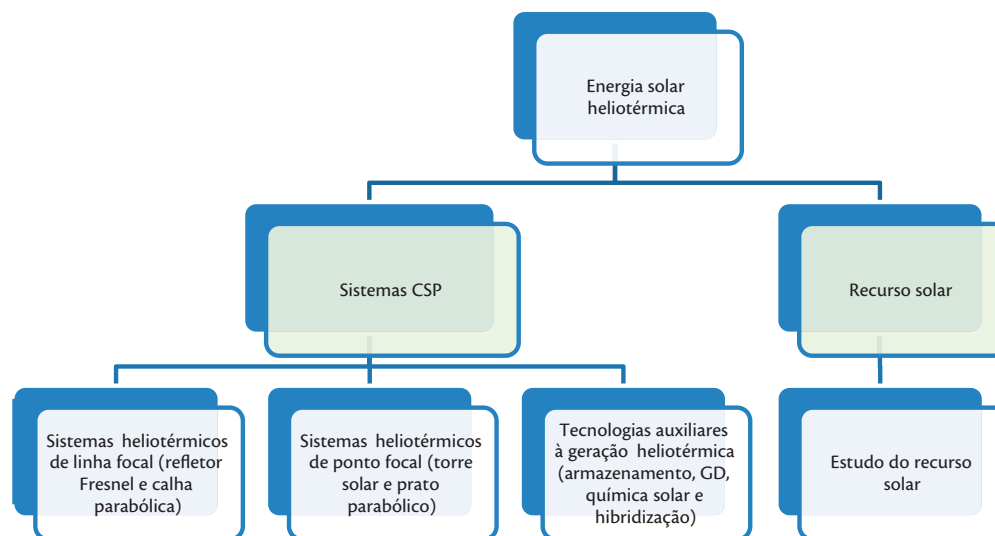


Figura 12 - Caracterização da macrotemática Energia Solar Heliotérmica (Preenchimento na cor verde; temáticas. Abaixo; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.

5.1. Visão de futuro

5.1.1. Cenário setorial

A energia solar térmica deverá ter uma participação discreta na matriz energética nacional até 2050. Este valor não deverá passar de 1% dos 400 GW a 480 GW de capacidade instalada prevista para 2050. Em países desenvolvidos como os EUA espera-se uma maior contribuição dessa tecnologia devido não somente ao elevado desenvolvimento das linhas de transmissão, como também à existência de grandes cidades perto de regiões desérticas com grande incidência solar.

5.1.2. Objetivo geral

Desenvolver tecnologia nacional de sistemas de geração heliotérmica por meio de plantas operacionais com vistas a alcançar a competitividade dessa fonte no setor elétrico e fomentar a indústria nacional.



5.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes, que incluem:

Curto Prazo (2017-2020)

- Desenvolver e implantar plantas piloto com as diferentes tecnologias heliotérmicas em diferentes escalas para estudos;
- Expandir a rede de medição e de tratamento de dados meteorológicos para heliotérmica;
- Desenvolver tecnologias de previsão da operação (mediante desenvolvimento de *software* e *hardware* para simulação e controle) e tecnologias de gestão de ativos das plantas heliotérmicas.

Médio Prazo (2020-2030)

- Desenvolver tecnologia nacional para a produção de espelhos eficientes com baixo custo e com refletividade acima de 96%;
- Desenvolver e aperfeiçoar a produção de trocadores de calor para sistemas heliotérmicos, receptores lineares, pontuais, Fresnel, evaporadores e condensadores;
- Desenvolver tecnologias para a co e trigerção de energia (produção de calor de processo e auxílio à geração de eletricidade);
- Desenvolver tecnologia de armazenamento de energia integrada a sistemas heliotérmicos (armazenamento térmico, como prioridade);
- Estudo para operacionalizar o uso dos sistemas heliotérmicos na transformação e na produção de insumos energéticos (química solar).

Longo Prazo (2030-2050)

- Desenvolver sistemas heliotérmicos integrados com outras fontes de geração (sistemas híbridos);
- Desenvolver tecnologias de integração da geração heliotérmica, sendo considerado o conceito de Oferta Descentralizada de Energia (conceito de GD associado à produção local de energia elétrica).

5.1.4. Fundamentação

Na Tabela 16 são mostradas as eficiências de operação nas partes principais de sistemas CSP existentes no mundo. Pode-se observar que a maioria dos componentes opera com eficiências elevadas, exceto o sistema de conversão de energia e o de concentração. A conversão da energia acontece no acionador primário e em trocadores de calor. O sistema ótico é formado pelos espelhos concentradores e pelo receptor, que também é um trocador de calor.

Na mesma tabela é possível observar, ainda, que os sistemas solar *dish*, embora sejam uma tecnologia com menor crescimento, são os que apresentam maior eficiência. A eficiência de uso da energia solar pode ser aumentada consideravelmente com esses sistemas devido à possibilidade de cogeração, com produção de água quente. Este potencial pode ser aproveitado em pequenos consumidores, lavanderias, restaurantes, pequenas indústrias, setor pecuaristas etc.

Na Tabela 17, é apresentado um resumo comparativo das principais tecnologias de CSP. O custo de investimento para instalações deste tipo é muito elevado, por isso a necessidade de nacionalização. Essas tecnologias têm um elevado potencial de redução de custo, já que seus componentes são relativamente fáceis de fabricar e operar, o que pode ser atingido com a maturidade tecnológica. Investir em tecnologias CSP hoje no Brasil é economicamente inviável, pois todos os componentes são importados.

Tabela 16 - Eficiência dos principais componentes de sistemas CSP em plantas CSP existentes (LOVEGROVE, 2014)

Eficiência anual média	Direct Steam Tower	Nevada Solar Trough	Novatec Linear Fresnel	Motor Stirling (tipo SES)
Irradiância normal direta (DNI) X abertura do espelho	100%	100%	100%	100%
Eficiência ótica global	51,8%	59,7%	39,2%	83,1%
Eficiência térmica receptor	86,6%	79,5%	89,9%	83,6%
Eficiência de transporte	100%	92,8%	99,2%	100%
Eficiência de conversão do ciclo	38%	35,7%	35,2%	30,1%
Eficiência elétrica bruta	87,5%	80,2%	91,5%	96%
Eficiência global	14,89%	12,59%	11,18%	20,08%

Fonte: Elaboração própria.



Tabela 17 - Comparação e características dos principais sistemas de concentração solar para gerar eletricidade (adaptado de X. Xu, et al. 2016; IEA-ETSAP; IRENA, 2013).

	Calha parabólica	Torre central	Refletor Fresnel	Prato parabólico
Capacidade (MW)	10-250	10-100	5-250	0,001-80
Temperatura op (°C)	90-400	300-1200	150-400	300-1500
Concentração	50-90	600-1000	35-170	<3000
Eficiência elétrica	8-16	10-22	8-12	16-29
Custo invest. US\$/kW	3.000-4.500	6.000-8.500	5.500-6.500	8.100-9.000
Ciclo utilizado	Rankine vapor e ORC	Rankine vapor e Brayton	Rankine vapor e ORC	Stirling, Rankine e Brayton
Maturidade comercial	Média-alta	Média	Média	Baixa
Possível melhoria	Limitada	Muito significativa	Significativa	Elevado potencial para a produção em massa
Vantagens	Confiabilidade, durabilidade, modularidade e ciclo combinado	Elevada eficiência, modularidade e ciclo combinado	Modularidade, simplicidade, construção e ciclo combinado	Modularidade, elevada eficiência e ciclo combinado, e não usa água
Desvantagens	Temperatura de operação limitada, estrutura complexa, precisa de água de esfriamento	Elevada manutenção e custos, precisa de água de esfriamento	Temperatura de op. limitada	Baixa maturidade comercial

Fonte: Elaboração própria.

Atualmente, não existe nenhum projeto comercial ou operacional de sistema CSP no País. As instalações existentes se limitam a uns poucos centros de pesquisa. Algumas vias para concretizar este objetivo são: buscar parceiros internacionais para nacionalizar total ou parcialmente a tecnologia. Como já foi mostrado na Tabela 16, é necessário focar nos componentes que podem contribuir a o aumento da eficiência da tecnologia. É o caso dos componentes do ciclo térmico: trocadores de calor, motores, turbinas, geradores etc. Também a pesquisa deve ser direcionada aos componentes óticos que concentram a irradiação solar como os espelhos e os trocadores de calor (receptores).

O trocador de calor do tipo receptor é o elemento principal em uma planta CSP. Este elemento é o encarregado de absorver a energia térmica do sol e direcioná-la ao ciclo termodinâmico para a

geração de potência. Este componente tem apresentado questões tecnológicas a serem resolvidas no projetos de plantas CSP existentes no mundo.

O cenário geral da tecnologia heliotérmica no Brasil será limitado pelo desenvolvimento que esta tecnologia tiver no cenário internacional. Há uma tendência crescente ao aumento dessa tecnologia no mundo, principalmente em países desenvolvidos da Europa, Ásia e Oceania, e também nos Estados Unidos, como pode ser visto na Tabela 18.

Tabela 18 - Capacidade mundial instalada de CSP até 2014 em MW (REN 21; WORLD ENERGY COUNCIL, 2016)

País	Total fim de 2013	Total 2014	Total 2016
Espanha	2300	2300	2362
EUA	882	1634	1804
Índia	50	225	454
Chile			220
Emirados Árabes	100	100	100
Argélia	25	25	25
Egito	20	20	20
Marrocos	20	20	183
Austrália	12	12	48
China	10	10	204
Tailândia	5	5	5
Total mundial	3425	4350	5425

Fonte: Elaboração própria.

A geração com sistemas fotovoltaicos deverá, primeiramente, frear o crescimento inicial da tecnologia CSP, mas depois deverá dar-lhe vez, já que os princípios de operação e o potencial de aplicação são diferentes. Por exemplo, com sistemas CSP é possível ter instalações de maiores potências e eficiências, com fatores de capacidade elevados, utilizando-se de sistemas de armazenamento térmico, além da possibilidade de geração de vapor e calor.

No caso específico do Brasil, soluções nacionais podem alavancar uma rápida aplicação dessa tecnologia. A integração térmica de sistemas CSP em plantas térmicas já existentes, que utilizam biomassa como



combustível, pode representar um mercado potencial. Um dos principais problemas apresentados pelas plantas CSP de alta temperatura é a incidência de falhas pelas variações de temperatura de operação no receptor, associadas às variações da irradiação solar (DUFFIE; BECKMAN, 2013). Este problema pode ser contornado se outra fonte de calor suprir as faltas de temperatura provenientes do sol, garantindo a redução dos gradientes de temperatura e evitando, assim, o estresse térmico provocado pela sazonalidade solar, garantindo operação confiável e estável.

Outra oportunidade para as tecnologias CSP é o desenvolvimento de pequenos sistemas de geração de ponto focal para aplicações em microescala, sistemas da ordem de dezenas de kW. Sistemas de pequeno porte com elevadas eficiências, entre 25% a 30%, estão disponíveis no mercado internacional para essas aplicações, podendo ser usada a energia solar e ou algum outro combustível complementar. Com esses sistemas também pode ser gerado calor em menor escala para pequenos processos comerciais e industriais.

Os principais componentes que devem ser desenvolvidos para poder consolidar a tecnologia CSP no Brasil são: sistemas de absorção e concentração da luz solar e equipamentos pertencentes ao ciclo térmico associado a uma planta solar térmica.

A indústria de fabricação de espelhos no Brasil tem condições técnicas e econômicas adequadas para desenvolver componentes (espelhos) para aplicações CSP de diferentes configurações, tanto no que se refere a materiais quanto a formatos. É uma tecnologia conhecida e só depende de incentivos econômicos como a existência de um mercado receptor para esses produtos.

Outro problema mais complexo refere-se à disponibilidade de motores e de turbinas que possam ser utilizados em sistemas CSP. Estes equipamentos não existem no Brasil e são de domínio de algumas poucas empresas. A sua introdução no Brasil pode ser custosa e demorada, além de aparecer incertezas na sua operação e manutenção. Por esta razão, é sugerido identificar potenciais componentes que possam ser adaptados da indústria nacional. O principal gargalo se encontra nas baixas potências, menos de 50 kW, já que maiores máquinas (turbinas a vapor) podem ser adequadas a partir de outras já existentes na indústria sucroalcooleira e de papel e celulose. Pelo menos para médias potências, até dezenas de MW.

Conforme mencionado, o componente mais crítico para o desenvolvimento mundial da tecnologia CSP é o trocador de calor de alta temperatura (receptor). Testes realizados no mundo todo têm mostrado que este componente, por estar sujeito a altos gradientes de temperaturas, sofre avarias que afetam diretamente a operação da planta CSP. O desenvolvimento de trocadores de calor de

alta temperatura no Brasil é pequeno, sendo que a maioria dos componentes usados na indústria é importada. Uma ênfase acentuada deve ser dada ao desenvolvimento desses equipamentos no Brasil.

Os sistemas de rastreamento solar ainda precisam de aprimoramento e ajustes, apesar de diferentes tecnologias desenvolvidas no mundo tentarem elevar o desempenho dessas instalações.

Os sistemas de armazenamento de energia térmica devem ser o diferencial da tecnologia CSP. Um sistema de armazenamento térmico pode garantir maior disponibilidade de energia solar inclusive durante os horários de pico, quando não há sol.

5.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática energia solar heliotérmica foi caracterizado em resposta a um conjunto de métricas (ver Anexo) que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo, levando-se em conta o período de tempo até 2050.

As métricas voltadas para a evolução tecnológica dizem respeito a/ao:

- Desenvolvimento de refletores (espelhos, lentes etc.) nacionais: o foco desta métrica é apresentar a evolução dessas tecnologias, tendo em consideração uma possível redução de custo. De uma forma macro, estima-se que em 2050 a eficiência do sistema óptico de concentração terá uma refletividade acima de 95%.
- Identificação e desenvolvimento de acionadores primários nacionais: aplicou-se esta métrica considerando-se a evolução tecnológica desse componente e levando-se em conta a redução dos custos de fabricação, a absorção da tecnologia e o aumento da eficiência. Neste contexto, estima-se elevar em até 10% a eficiência de acionadores primários, empregando materiais de elevada resistência, tanto à temperatura quanto a atritos, otimizando sistemas de selagem (foco 2030).
- Teste e desenvolvimento de trocadores de calor mais eficientes: diz respeito ao desenvolvimento nacional dessa tecnologia, considerando-se o horizonte 2050, com foco em mitigar custos



de fabricação e obter o domínio da tecnologia. Neste contexto, estima-se elevar em 10% a eficiência dos trocadores desenvolvidos acoplados a acionadores nacionais ou não (foco 2030).

- Nacionalização da tecnologia: considera, no horizonte 2050, a evolução da absorção da tecnologia pelo Brasil. De uma forma macro, espera-se que até 2030 existam protótipos nacionalizados operando com pelo menos 50% dos seus principais componentes tendo sido fabricados no Brasil.
- Estudo e desenvolvimento de *softwares* e de *hardwares* para o rastreamento solar eficiente: caracteriza a evolução do *know-how* nacional, no período considerado, no que diz respeito ao desenvolvimento de *softwares* e de componentes eletrônicos. No contexto da macrotemática, espera-se que até 2050 tenhamos domínio teórico e prático dessas questões, principalmente no que diz respeito à sua aplicação em sistemas de rastreamento solar.
- Estudo e proposta de legislação para incentivar a inserção da tecnologia solar térmica no Brasil, usando a alternativa de hibridização térmica CSP-Biomassa: esta métrica mensura a evolução das normas voltadas ao desenvolvimento da tecnologia CSP no Brasil. Espera-se, no contexto macro, que em 2030 haja legislação que garanta que pelo menos uma usina experimental híbrida CSP-biomassa seja instalada no Brasil, e que também incentive a inserção de sistemas híbridos CSP-biomassa; e em 2050 haja fomento para elevar em 10% a eficiência dos novos sistemas SCP-biomassa instalados no Brasil.
- Desenvolvimento e fabricação de novos materiais: esta métrica apresenta a evolução do nível de produção nacional de novos materiais. No contexto da macrotemática, espera-se que em 2050 pelo menos 50% dos materiais utilizados em usinas CSP sejam de procedência nacional.
- Desenvolvimento e disponibilidade de sistemas de armazenamento de energia térmica, mecânica e elétrica: a métrica diz respeito à evolução do aumento do fator de carga dada à participação das tecnologias de armazenamento de energia. Neste contexto, espera-se elevar o fator de carga em plantas CSP acima de 10% até 2050.
- Sistemas de controle integrando variáveis ambientais (sol, vento, chuva) à operação contínua do ciclo termodinâmico e eletromecânico: diz respeito à evolução do desenvolvimento de sistemas de controle integrados à planta CSP. Sob o ponto de vista macro, espera-se que em 2050 o País tenha esses sistemas totalmente desenvolvidos.

As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado estão apresentadas na planilha de indicadores, conforme instruções constantes na própria planilha.

No âmbito da estratégia setorial, o objetivo dos principais setores que podem contribuir para o desenvolvimento da tecnologia CSP deve ser: implementar a tecnologia em regiões que realmente tenham disponibilidade de recurso solar e que possam ser beneficiadas com a geração de emprego e renda que essa tecnologia pode brindar, por exemplo:

- Incentivar o desenvolvimento de sistemas híbridos, acoplando a CSP a plantas que queimem biomassa, como é o caso do setor do açúcar e do álcool, da utilização de gás de altos fornos, de gás de carbonização etc.;
- Incentivar a instalação de plantas CSP em regiões com alta disponibilidade de recurso solar, como é o caso de algumas regiões do Nordeste e do sertão;
- Promover políticas de incentivo a financiamentos e à venda da eletricidade por plantas CSP é imprescindível para que esta tecnologia possa ser utilizada.

No contexto socioambiental, o impacto que a instalação de sistemas CSP tem é evidente. A aplicabilidade da tecnologia é mais adequada a regiões onde tenha mais recurso solar, portanto, em regiões desérticas ou semiáridas onde a água potável é extraída de poços ou onde poderia ser produzido calor para dessalinizar a água salobra ou a água do mar.

Sobre a produção de CT&I, os sistemas CSP, por se tratarem de uma tecnologia pouco desenvolvida e em que se aplicam conceitos científicos básicos, podem gerar patentes e publicações científicas.

Em CT&I existem hoje no Brasil poucos cientistas atuando, mas, por ser uma área de conhecimento básico, há um grande número de profissionais que podem migrar para ela sem grande dificuldade. Existem várias redes de colaboração internacionais e nacionais que atuam na área solar, mas há grande déficit de laboratórios e de centros de desenvolvimento tecnológico.

No contexto da indústria e do mercado, a tecnologia CSP é quase nula, isto devido ao pouco interesse e incentivo e aos elevados preços que os sistemas CSP apresentam. Por outro lado, é uma tecnologia muito mais simples do que a solar fotovoltaica. Sendo resolvidos os problemas técnicos e econômicos apresentados, pode passar a ser uma tecnologia competitiva.



5.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associadas aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta: i) as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas; e ii) os fatores portadores de futuro que suportam essa evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

5.3.1. Temática estudo do recurso

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade da rota tecnológica desta temática.

Rota - Estudo do recurso solar

As linhas de base para a evolução dessa rota dizem respeito ao desenvolvimento ou aprimoramento de modelos de radiação solar para a identificação de potenciais regiões e locais e estudo de caracterização de locais com foco na instalação de estações meteorológicas específicas para a medição instantânea da irradiação solar direta normal (*Direct Normal Irradiance - DNI*). Ver Gráfico 29.

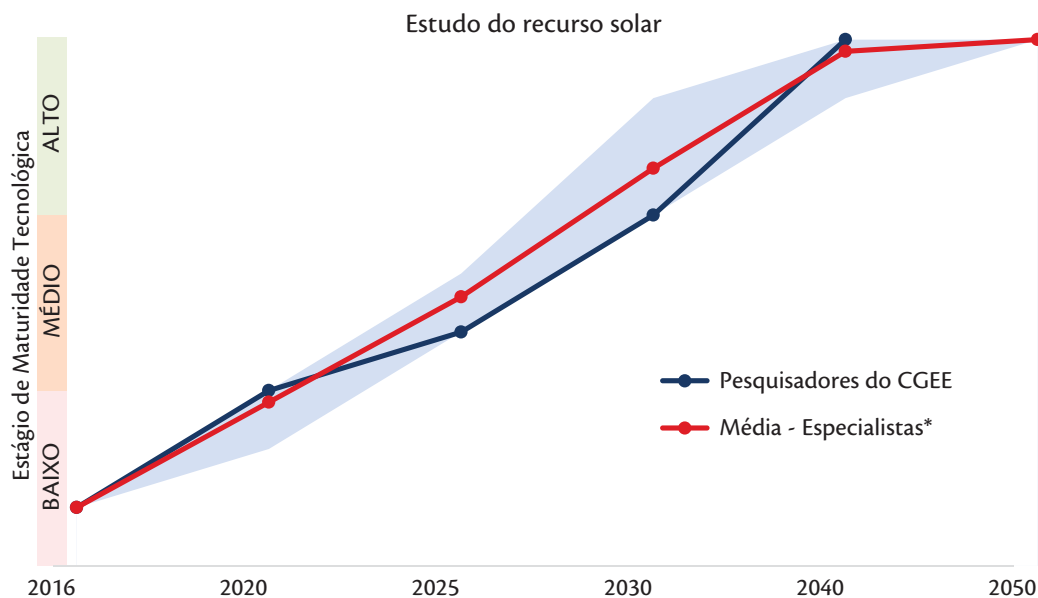


Gráfico 29 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudo do Recurso Solar

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade da respectiva rota são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota Estudo do Recurso Solar

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Recurso solar	Estudo do recurso solar	Fatores portadores de futuro	Instalação de estações solarimétricas visando ao estudo do recurso solar térmico e à definição de padrões metroológicos	Definição de protocolos metroológicos e de tecnologias de medição avançadas	Instalação das estações de medição em pontos estratégicos	Caracterização de métricas para análise e mapeamento das rotas solarimétricas	Disponibilidade de mapa solar térmico do Brasil e acesso online dessas informações	Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.



5.3.2. Temática sistemas CSP

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rotas - Sistemas heliotérmicos de linha focal e de ponto focal

Nesse contexto, as linhas de pesquisa dizem respeito ao desenvolvimento de projetos piloto com foco na verificação do comportamento do sistema e dedicados ao estudo para elevar a eficiência dos sistemas heliotérmicos de geração de energia elétrica (novos materiais dedicados aos absorvedores solares, visando à melhor absorção da radiação com a mínima reflexão de ondas eletromagnéticas) e desenvolver materiais capazes de suportarem altas temperaturas e cargas térmicas cíclicas aplicados aos receptores e aos sistemas de armazenamento, das tecnologias de concentradores solares (ver Gráfico 30 e Gráfico 31)

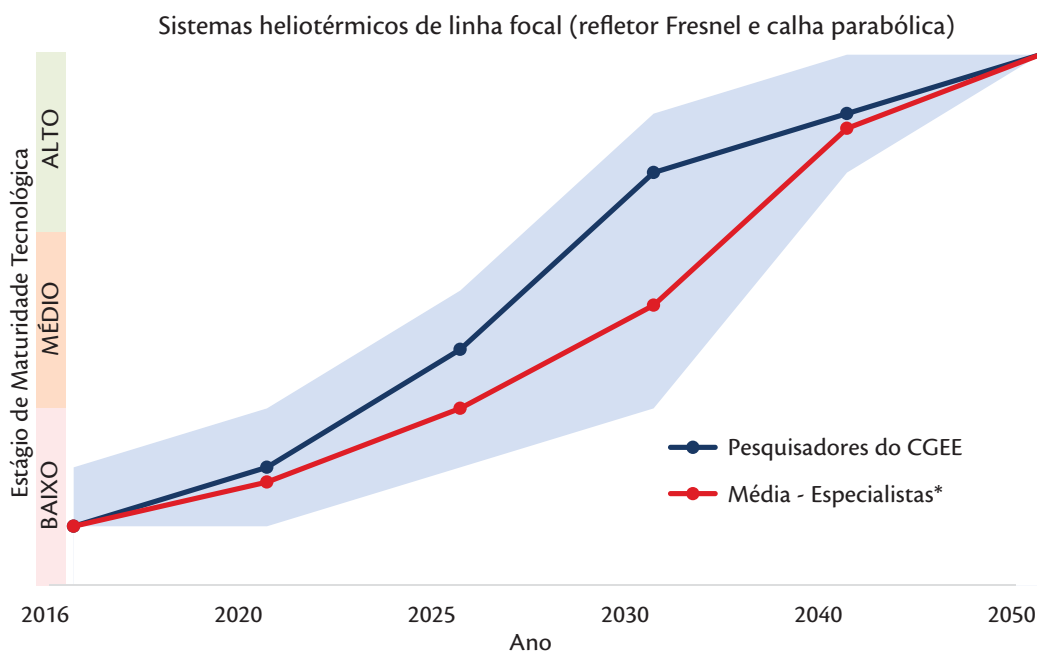


Gráfico 30 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas Heliotérmicos de Linha Focal (refletor Fresnel e calha parabólica)

Fonte: Elaboração própria.

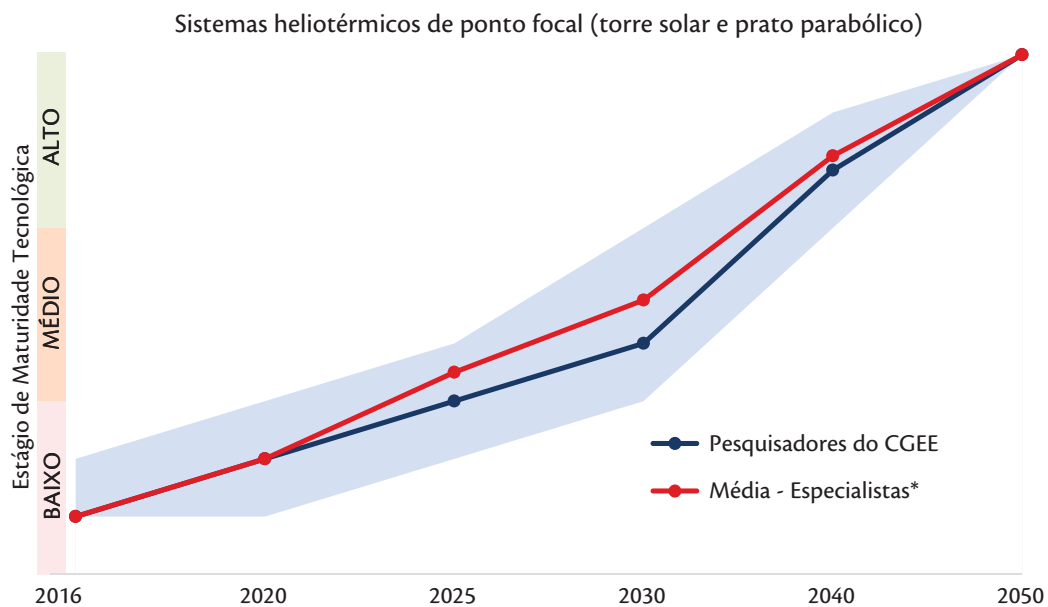


Gráfico 31 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas Heliotérmicos de Ponto Focal (torre solar e prato parabólico)

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Aplicações dos sistemas CSP (GD, química solar, armazenamento, hibridização)

Implantação de sistemas piloto de armazenamento térmico com tecnologias baseadas em calor latente, calor sensível e reações químicas e desenvolvimento de sistemas de integração de geração híbrida (termoelétrica a biomassa e não renováveis com auxílio heliotérmico). Ver Gráfico 32.

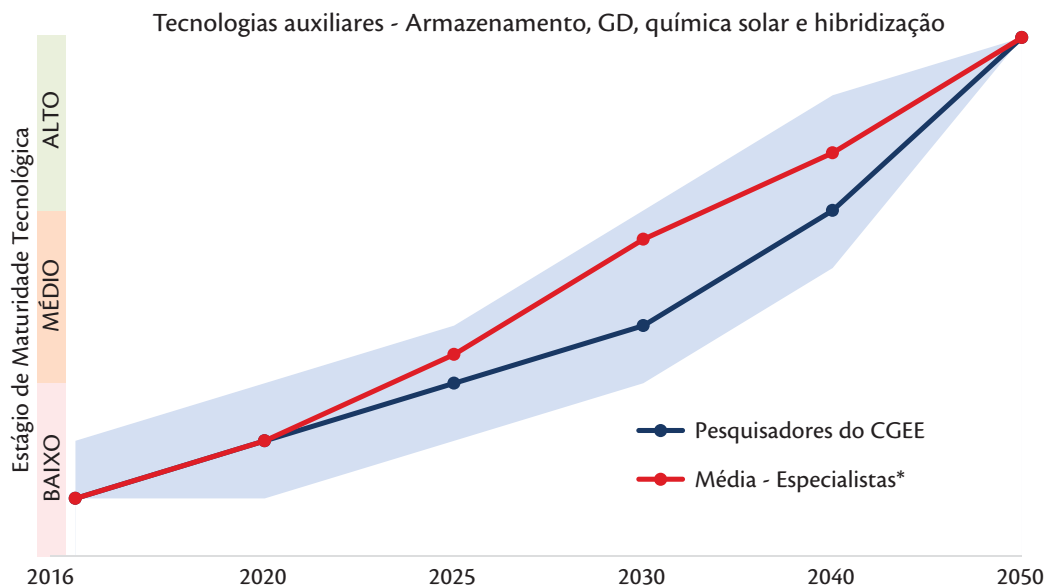


Gráfico 32 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Tecnologias Auxiliares: armazenamento, GD, química solar e hibridização

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistemas Heliotérmicos de Linha Focal (refletor Fresnel e calha parabólica), Sistemas Heliotérmicos de Ponto Focal (torre solar e prato parabólico) e Tecnologias Auxiliares: armazenamento, GD, química solar e hibridização

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Sistemas CSP	Sistemas heliotérmicos de linha focal (refletor Fresnel e calha parabólica)	Fatores portadores de futuro	Investimento inicial (RS), capacitação da CT&I e da cadeia produtiva	Investimento inicial (RS), capacitação da CT&I e da cadeia produtiva	Desenvolvimento de protótipos em escala laboratorial e caracterização de métricas de avaliação da tecnologia	Estudos da aplicação da tecnologia no setor elétrico (integração ao SIN, sistemas isolados, soluções apropriadas para regiões remotas)	Teste piloto e protocolo de diagnóstico desenvolvido, sistemas de integração de fontes e sistemas de armazenamento desenvolvidos	Tecnologias de implantação, O&M e monitoramento de descomissionamento maduros Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Sistemas heliotérmicos de ponto focal (torre solar e prato parabólico) focal	Fatores portadores de futuro	Investimento inicial (RS), capacitação da CT&I e da cadeia produtiva	Investimento inicial (RS), capacitação da CT&I e da cadeia produtiva	Desenvolvimento de protótipos em escala laboratorial e caracterização de métricas de avaliação da tecnologia	Estudos da aplicação da tecnologia no setor elétrico (integração ao SIN, sistemas isolados, soluções apropriadas para regiões remotas)	Teste piloto e protocolo de diagnóstico desenvolvido, sistemas de integração de fontes e sistemas de armazenamento desenvolvidos	Tecnologias de implantação, O&M e monitoramento de descomissionamento maduros Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação
		Maturidade	BAIXO				MÉDIO	ALTO
	Tecnologias auxiliares à geração heliotérmica (armazenamento, GD, química solar e hibridização)	Fatores portadores de futuro	Investimento inicial (RS), capacitação da CT&I e da cadeia produtiva	Investimento inicial (RS), capacitação da CT&I e da cadeia produtiva	Desenvolvimento de protótipos em escala laboratorial e caracterização de métricas de avaliação das tecnologias	Estudos da aplicação da tecnologia no setor elétrico (integração ao SIN, sistemas isolados, soluções apropriadas para regiões remotas)	Teste piloto e protocolo de diagnóstico desenvolvido, sistemas de integração de fontes e sistemas de armazenamento desenvolvidos	Tecnologias de implantação, O&M e monitoramento de descomissionamento maduros Bases técnica e de fomento ativas para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação
		Maturidade	BAIXO				MÉDIO	ALTO

Fonte: Elaboração própria.



5.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro.

Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas, conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Estudo do recurso solar	Estudo do recurso
2	Aplicações dos sistemas CSP (GD, química solar, armazenamento, hibridização)	Sistemas
3	Sistemas heliotérmicos de ponto focal (torre solar e prato parabólico)	Sistemas
4	Sistemas heliotérmicos de linha focal (refletor Fresnel e calha parabólica)	Sistemas

Fonte: Elaboração própria.

O estudo do recurso solar é muito importante para traçar um plano objetivo dos locais onde realmente seria viável a instalação de plantas CSP. Esta é uma tecnologia disponível no mercado, através das estações solarimétricas. Inicialmente, deve-se levantar os maiores potenciais para CSP no Brasil, visando, em um futuro a médio prazo, à disponibilização desses dados *online*, para que a falta de dados solarimétricos não seja uma limitante, como é hoje. Algo similar deve acontecer com a necessidade de ter laboratórios para testar as diferentes tecnologias e componentes dos sistemas CSP.

Outros sistemas como o armazenamento de energia térmica e a produção de biocombustíveis a partir da concentração solar são tecnologias que precisam de mais desenvolvimento, dada a sua complexidade. Neste contexto, é preciso pesquisar novos materiais e insumos. O preço baixo do petróleo é um grande limitador para o desenvolvimento de sistemas de produção de biocombustíveis. Contudo, esta rota, quando desenvolvida, trará o melhor custo-benefício da aplicação da tecnologia de geração solar heliotérmica, considerando-se questões financeiras e de meio ambiente.

O desenvolvimento da tecnologia heliotérmica de geração de vapor dependerá fortemente do incentivo que o setor energético venha a dedicar a essa tecnologia, visando à inserção de recursos renováveis, principalmente no setor industrial. O vapor pode ser gerado com sistemas heliotérmicos em uma grande variedade de indústrias que hoje consome combustíveis fósseis, o que pode ser reduzido drasticamente. É uma tecnologia que pode ter uma maturidade acelerada. Isto porque a maioria dos possíveis usuários já utiliza alguma fonte de energia térmica que pode ser hibridizada junto à energia de concentração solar.

Na tecnologia de ponto focal Torre Central, relações de concentração da ordem de mil vezes podem ser alcançadas, garantindo eficiências acima de 20%, mas as variações da irradiação solar podem produzir gradientes de temperatura que deterioram esse trocador de calor. Os sistemas de torre central também são dependentes do desenvolvimento dos sistemas de armazenamento de energia térmica.

Por outro lado, os sistemas de disco parabólico apresentam uma maturidade similar à dos sistemas de torre central. Com potencial para eficiências maiores, acima dos 30%, seu principal problema é o custo. Estes sistemas têm vários fornecedores no mundo, entre eles: Cleanery, STM, Wirpergen e Microgen, dentre outros. O incentivo ao seu uso em comunidades isoladas pode favorecer seu rápido crescimento. A diferença desses sistemas para os de torre central é que, por serem mais compactos, têm maior facilidade de controlar os gradientes de temperatura e também podem utilizar um combustível auxiliar. Por ser uma tecnologia que pode alcançar uma elevada eficiência, a geração heliotérmica de ponto focal de disco parabólico supera em prioridade a tecnologia de geração heliotérmica de linha focal.

A tecnologia de linha focal calha parabólica apresenta algumas limitações técnicas, devido à baixa concentração dos espelhos parabólicos, da ordem de cem vezes, e teoricamente este valor só poderia chegar a até cerca de duzentos sóis, elevando a sua eficiência ao dobro. A sua maturidade dependerá do desenvolvimento de espelhos mais eficientes, de fluxos de trabalho que permitam a geração de um salto entálpico, de sistemas de coleta de irradiação de maior efetividade e de um bloco térmico de maior eficiência de conversão. Com isso, esta tecnologia poderia ir dos 12% de eficiência atuais para até cerca de 25%.



Capítulo 6



Capítulo 6

Macrotemática Energia dos Oceanos

Sobre esta macrotemática deve-se ter em perspectiva que a conversão das fontes renováveis dos oceanos ainda se encontra em estágio de avanço tecnológico anterior ao das fontes eólicas e solar, tendo estas demandado esforços robustos de PD&I por mais de 30 anos até atingirem a fase comercial. Portanto, é prematuro o julgamento sobre a falta de competitividade das fontes oceânicas, visto que as atividades visando à sua comercialização têm avançado somente nos últimos 15 anos. A isto se somam os custos associados ao desenvolvimento tecnológico e à implantação de protótipos, normalmente mais vultosos no ambiente marinho.

Estima-se que a comercialização da conversão das fontes oceânicas irá se acentuar em meados da década de 2020, especialmente em alguns nichos dos setores econômicos e de defesa baseados nas atividades oceânicas. Como exemplos de nichos de demanda por energia em atividades oceânicas podem-se citar a pesca, a produção de petróleo *off-shore* e a mineração submarina, além do interesse das atividades de defesa. Outra questão que deve impulsionar a comercialização de fontes oceânicas renováveis é o aquecimento global, que, na medida de sua evolução, irá trazer forte demanda da sociedade pela agregação de novas fontes renováveis.

Para discutir o potencial global das fontes de energia renovável do mar é importante definir o tipo de potencial, sendo os principais (KREWITT *et al.*, 2009):

- **Potencial teórico:** nível mais alto de potencial. Este potencial só leva em conta as restrições referentes aos parâmetros naturais e climáticos;
- **Potencial técnico:** o potencial geográfico é o mais reduzido devido às limitações técnicas tais como a eficiência de conversão e de armazenamento de energia elétrica.

Deve-se notar que, até agora, relativamente poucas avaliações foram realizadas sobre o potencial técnico das diversas fontes de energia dos oceanos e esses potenciais irão variar de acordo com o desenvolvimento futuro da tecnologia. Ronger *et al.* (2000) apresentaram um potencial teórico total de mais de dois milhões de TWh/ano para a fonte global de energia do oceano, excluindo-se a

energia eólica. No entanto, o potencial técnico foi estimado no intervalo de 2000 TWh/ano a 92000 TWh/ano (KREWITT *et al.*, 2009; SIMS *et al.*, 2007). O potencial técnico da energia eólica marinha estimado por Krewitt *et al.* (2009) é de 16000 TWh/ano em 2050. O potencial teórico da energia das ondas é de cerca de 32000 TWh/ano (MORK *et al.*, 2010), com um potencial técnico de 5600 TWh/ano (KREWITT *et al.*, 2009). O potencial de recursos de energia renovável do oceano é dominado pelo gradiente térmico, com um potencial teórico de cerca de 44000 TWh/ano (NIHOUS, 2007). O gradiente de salinidade tem um potencial técnico estimado de 1650 TWh/ano (SKRÅMESTØ *et al.*, 2009).

Considerando-se este cenário, a macrotemática foi estruturada tal qual o mostrado na Figura 13 para direcionar as considerações que serão feitas neste trabalho.

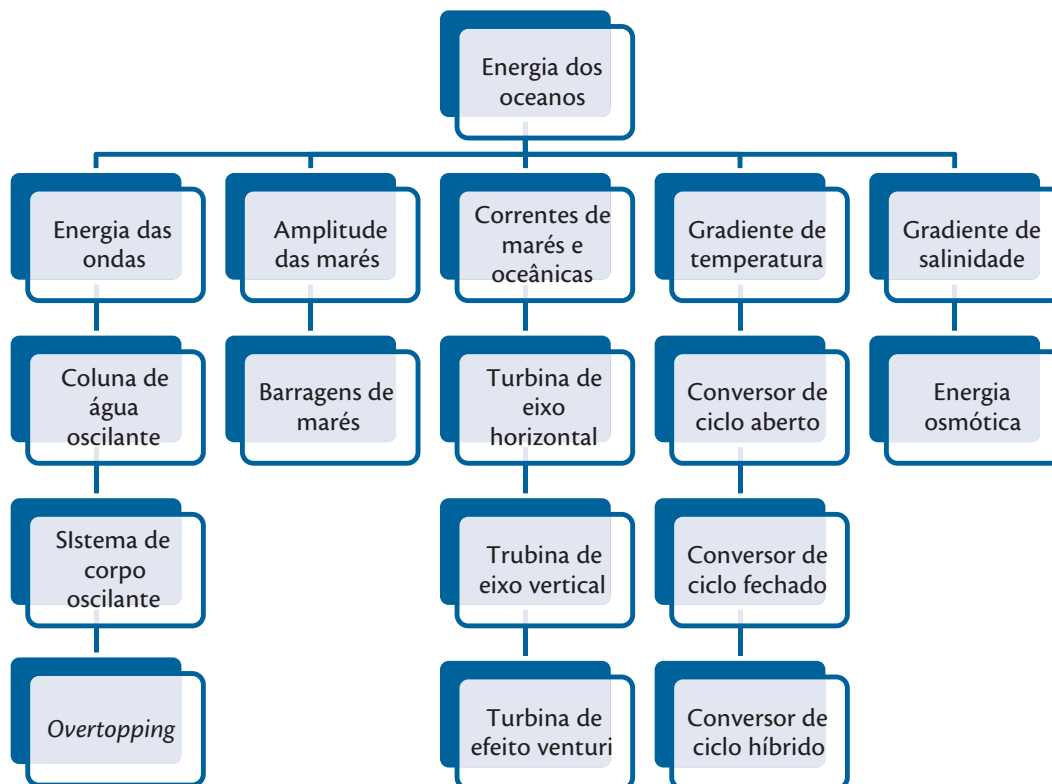


Figura 13 - Caracterização da macrotemática Energia dos Oceanos (Preenchimento na cor verde; temáticas. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.



Conforme apresentado na Figura 13, as temáticas dizem respeito a:

- **Ondas:** originadas da transferência da energia cinética do vento para a superfície livre do mar;
- **Marés:** derivadas das forças gravitacionais do sistema Terra-Lua-Sol, que podem ser subdivididas em duas categorias:
 - **amplitudes de marés**, resultantes da variação das amplitudes devido às marés altas e baixas nas regiões costeiras;
 - **correntes de marés**, resultantes do fluxo de água devido às marés alta e baixa nas regiões costeiras;
- **Correntes oceânica:** oriundas da ação dos ventos e da circulação oceanográfica devido às diferenças térmicas e de salinidade;
- **Gradiente térmico:** derivado da diferença de temperatura entre a energia solar armazenada em camadas superiores do oceano e a água mais fria, geralmente abaixo de mil metros;
- **Gradiente de salinidade:** oriundo da diferença de salinidade entre a água doce e a água salgada, ocorre na foz do rio desaguando no oceano.

6.1. Visão de futuro

6.1.1. Cenário setorial

A evolução da demanda de energia elétrica até 2050 deve exigir algo entre 400 GW e 480 GW de capacidade instalada do SIN. Este cenário trará desafios como a diversificação e a ampliação do parque gerador para atender à demanda esperada. Ao ser considerada, também, a ampliação das atividades industriais nos oceanos, associadas à mineração submarina, às fazendas marinhas e à produção de petróleo *off-shore*, nas próximas três décadas, tem-se uma oportunidade promissora para que as fontes de energia renovável dos oceanos sejam utilizadas na geração elétrica para o continente e, também, para as atividades econômicas no oceano.

Deve-se ter em perspectiva que a conversão das fontes renováveis dos oceanos ainda se encontra em estágio de avanço de maturidade anterior ao das fontes eólicas e solar, tendo estas demandado esforços robustos de PD&I por mais de 30 anos, até atingirem a fase comercial. Portanto, é prematuro qualquer julgamento sobre a falta de competitividade das fontes oceânicas, visto que as atividades visando à sua comercialização têm avançado somente nos últimos 15 anos. A isto se somam os

custos associados ao desenvolvimento tecnológico e à implantação de protótipos, normalmente mais vultosos no ambiente marinho.

Estima-se que a comercialização da conversão das fontes oceânicas irá se acentuar em meados da década de 2020, especialmente em alguns nichos dos setores econômicos e de defesa baseados nas atividades oceânicas. Como exemplos de nichos de demanda por energia em atividades oceânicas podem-se citar a pesca, a produção de petróleo *off-shore* e a mineração submarina, além do interesse das atividades de defesa. Outra questão que deve impulsionar a comercialização de fontes oceânicas renováveis é o aquecimento global, que na medida de sua evolução irá trazer forte demanda da sociedade pela agregação de novas fontes renováveis.

6.1.2. Objetivo geral

O foco da PD&I está em desenvolver tecnologias nacionais de geração de eletricidade via energia das ondas (coluna de água oscilante, corpo oscilante) e via energia das marés (amplitude e corrente de maré), por meio de plantas operacionais. Em longo prazo, o foco da PD&I está em desenvolver tecnologias nacionais de geração de eletricidade via gradientes térmico e de salinidade.

6.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes.

Curto Prazo (2017-2020)

- Desenvolvimento de tecnologias ou de métodos para a avaliação dos recursos energéticos ao longo da costa brasileira;
- Desenvolvimento ou aprimoramento de tecnologias de avaliação dos impactos ambientais provocados pela presença das usinas oceânicas;
- Pilotos em áreas diversificadas na costa brasileira.



Médio Prazo (2020-2030)

- Desenvolvimento de plantas operacionais para a geração via energia das ondas e via energia das marés;
- Desenvolvimento de tecnologias nacionais de integração de elementos dos sistemas de geração via energia dos oceanos (via energia das ondas e via energia das marés);
- Desenvolvimento de técnicas de manutenção preditiva avançadas e intervenções para reparo em parques de conversores (via energia das ondas e via energia das marés);
- Aperfeiçoamento de sistemas de conversão, com ênfase nos desempenhos hidrodinâmicos, elétrico e nas técnicas de controle (via energia das ondas e via energia das marés).

Longo Prazo (2030-2050)

- Desenvolvimento de plantas operacionais para a geração via gradientes térmico e de salinidade;
- Desenvolvimento de tecnologias nacionais de integração de elementos dos sistemas de geração via energia dos oceanos (gradiente de salinidade e temperatura);
- Desenvolvimento de técnicas de manutenção preditiva avançadas e intervenções para reparo em parques de conversores (gradiente de salinidade e temperatura);
- Aperfeiçoamento de sistemas de conversão, com ênfase nos desempenhos hidrodinâmicos, elétrico e nas técnicas de controle (gradiente de salinidade e temperatura).

6.1.4. Fundamentação

Os objetivos de curto, médio e longo prazos estão vinculados à visão estratégica sobre a oportunidade de desenvolvimento econômico e social que será propiciada pelo desenvolvimento de PD&I de fontes oceânicas renováveis que levem à geração de eletricidade e, também, a processos de dessalinização de água do mar a partir dessas fontes. Esta oportunidade é baseada na capacidade nacional já estabelecida em ciências e tecnologia do mar, assim como nas atividades internacionalmente reconhecidas na produção de óleo e gás em águas profundas. As tecnologias oriundas dessas atividades, com seus respectivos processos e produtos, terão papel destacado na indução de processos industriais e serviços no novo setor de energia renovável dos oceanos.

6.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática energia dos oceanos foi caracterizado em resposta a um conjunto de métricas (ver Anexo) que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo, levando-se em conta o período de tempo até 2050.

Sobre a evolução tecnológica, as métricas associadas a esta questão são:

- Sistema mecânico do conversor;
- Sistema elétrico do conversor;
- Sistema de controle;
- Mapeamento de recursos;
- Barragem do Bacanga (MA) como Laboratório Maremotriz;
- Validação do protótipo em ambiente relevante;
- Sistema de fixação/geotecnia para turbinas submersas;
- Estrutura flutuante;
- Risers (dutos do fundo à superfície) de grande diâmetro;
- Membrana semipermeável;
- Novas formas do armazenamento de energia;
- Cabo submarino;
- Sistema de dessalinização;
- Novas tecnologias de monitoramento.

As métricas apresentadas, de uma forma geral, são aplicadas a todas as rotas, com exceção das métricas membrana semipermeável e sistema de dessalinização, próprias das tecnologias de geração de energia via gradiente de salinidade marinha. As respectivas métricas indicam quais tecnologias devem ser aprimoradas, considerando-se o período até 2050. No contexto da macrotemática, a evolução tecnológica deve ser contínua e um nível de maturidade elevada para essas tecnologias deve ser alcançado entre os anos de 2030 a 2050.



As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado estão apresentadas na planilha de indicadores, conforme instruções constantes na própria planilha. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias, as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e setor elétrico brasileiro potencializam a melhora ou a participação dessas questões no setor elétrico brasileiro, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

6.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associadas aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta: i) as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas; e ii) os fatores portadores de futuro que suportam essa evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

6.3.1. Temática energia das ondas

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rotas - Coluna de água oscilante, sistema de corpo oscilante e acumulador de água do mar (reservatório) via movimento horizontal das ondas (*Overtopping*)

As linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das respectivas rotas tecnológicas desta temática dizem respeito ao desenvolvimento de modelos reduzidos para estudos em laboratórios e ao desenvolvimento de modelos em escalas iguais ou superiores a um quarto da escala real, para estudos em operações no mar (ver Gráfico 33, Gráfico 34 e Gráfico 35).

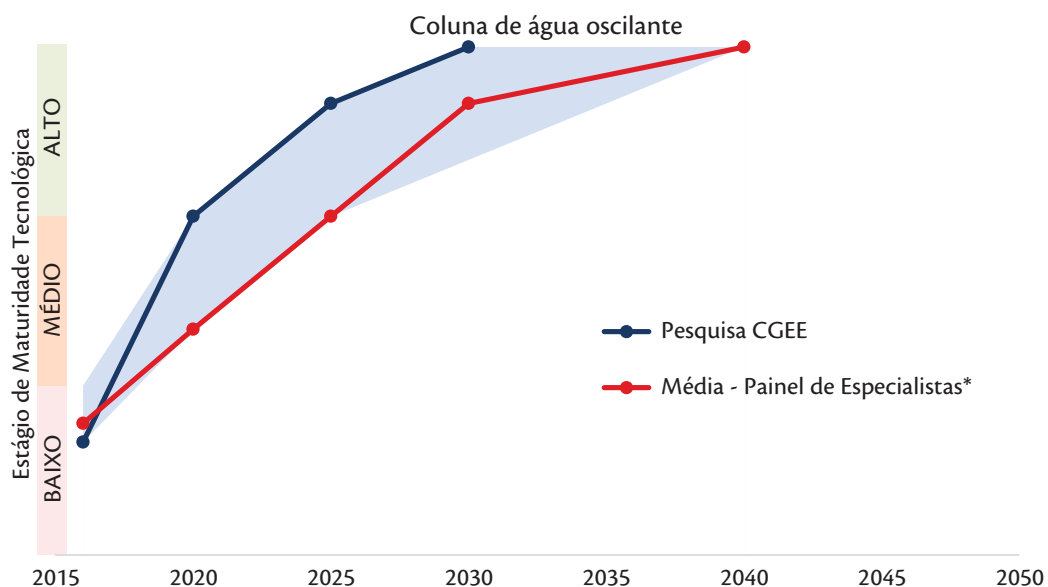


Gráfico 33 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Coluna de Água Oscilante

Fonte: Elaboração própria.

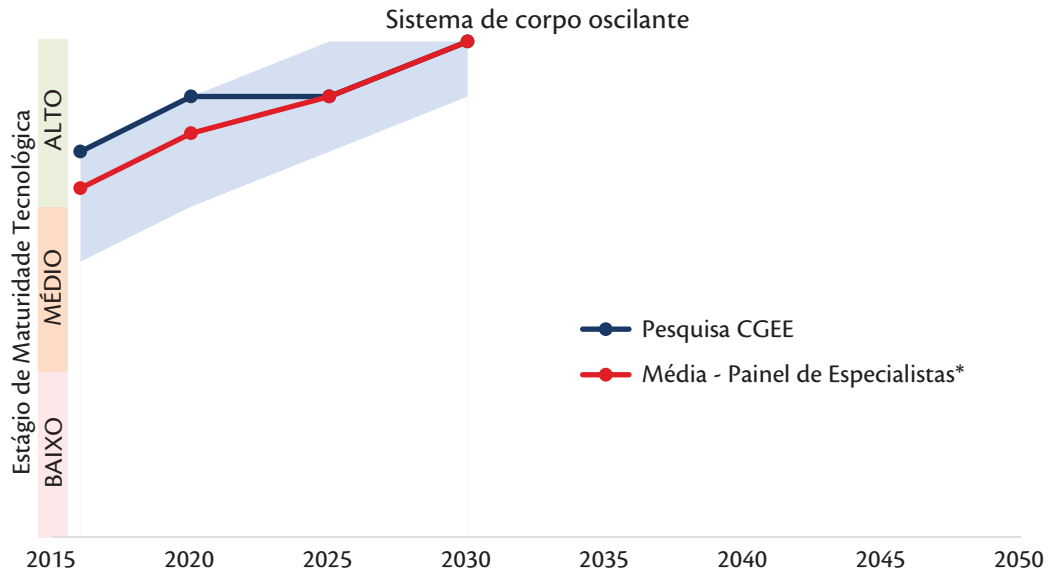


Gráfico 34 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Corpo Oscilante

Fonte: Elaboração própria.

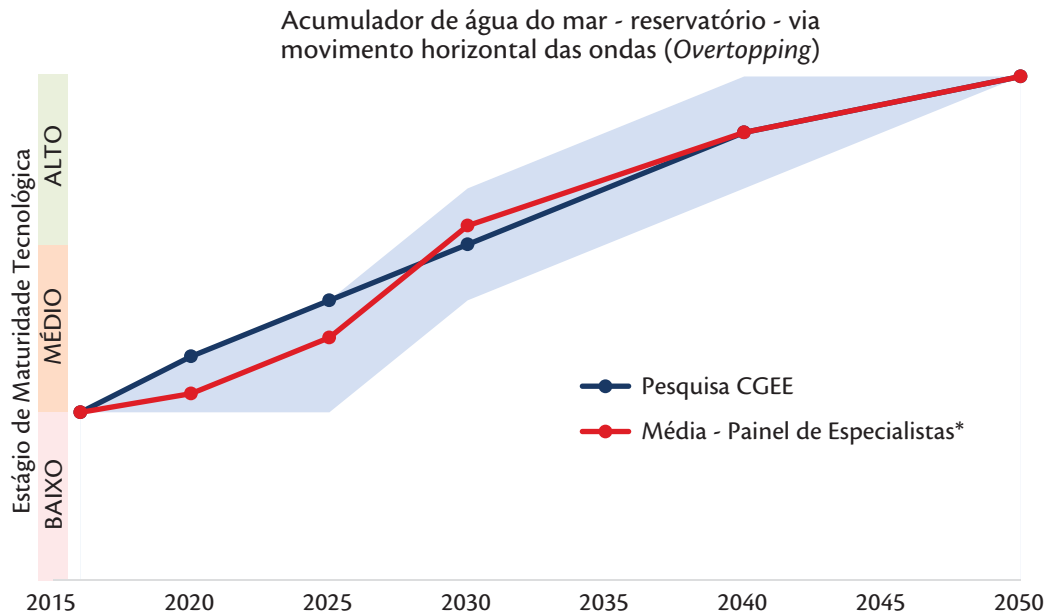


Gráfico 35 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Acumulador de Água do Mar (Reservatório), via Movimento Horizontal das Ondas (*Overtopping*)

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Coluna de Água Oscilante, Sistema de Corpo Oscilante e Overtopping

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Energia das ondas	Coluna de água oscilante	Fatores portadores de futuro	Investimentos (RS), estudo dos recurso e investimento em CT&I e cadeia produtiva	Protótipo em escala laboratorial, sistemas de O&M e monitoramento, sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Protótipo em escala laboratorial, sistemas de O&M e monitoramento, sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Protótipo em escala real, incorporação dos sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento, tecnologias e protocolos de O&M e monitoramento. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
		Fatores portadores de futuro	Protótipo em escala real	Incorporação dos sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento, tecnologias e protocolos de O&M e monitoramento. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.				
	Sistema de corpo oscilante	Maturidade	ALTO					
		Fatores portadores de futuro	Protótipo em escala laboratorial, sistemas de O&M e monitoramento, sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Protótipo em escala laboratorial, sistemas de O&M e monitoramento, sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Protótipo em escala laboratorial, sistemas de O&M e monitoramento, sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Protótipo em escala real, incorporação dos sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento, tecnologias e protocolos de O&M e monitoramento. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.		
	Overtopping	Maturidade	ALTO					
		Fatores portadores de futuro	Protótipo em escala laboratorial, sistemas de O&M e monitoramento, sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Protótipo em escala laboratorial, sistemas de O&M e monitoramento, sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Protótipo em escala laboratorial, sistemas de O&M e monitoramento, sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Protótipo em escala real, incorporação dos sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento, tecnologias e protocolos de O&M e monitoramento. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.		
		Maturidade	MÉDIO				ALTO	

Fonte: Elaboração própria.



6.3.2. Temática amplitude de marés

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Barragens de marés

As linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade da rota tecnológica dizem respeito à integração dessa tecnologia e de outras fontes renováveis em sistemas isolados e no desenvolvimento de projetos piloto de microgeração de maré para demandas isoladas. Ver Gráfico 36.

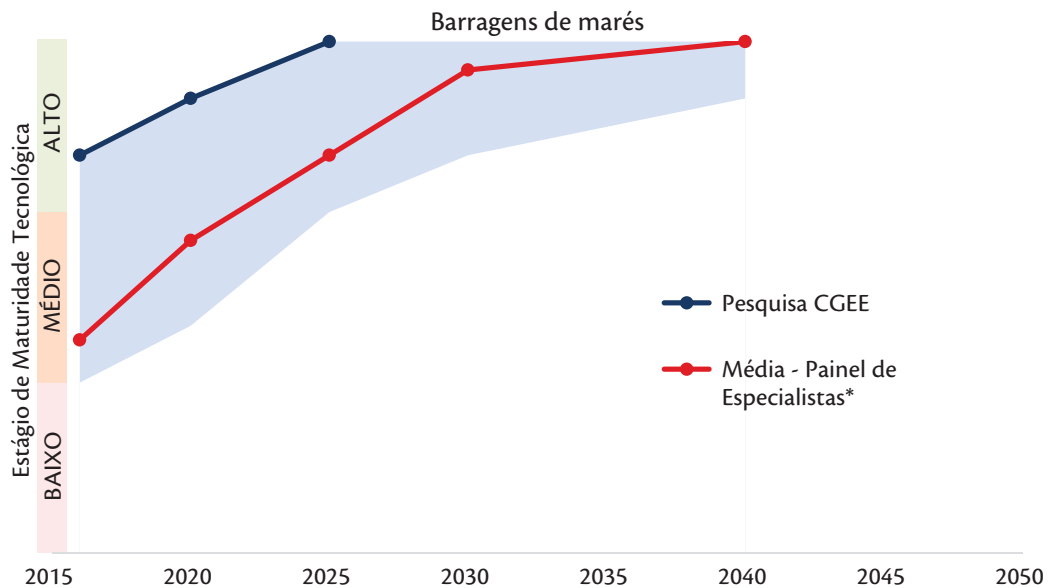


Gráfico 36 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Barragens de Marés Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade da respectiva rota são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota Barragens de Marés

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Amplitude das marés	Barragens de marés	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais (RS), estudo do recurso energético, investimento em CT&I e cadeia produtiva	Caracterização da energia dos oceanos no BR, aumento da demanda energética, otimização do conversor de energia (foco eficiência)	Desenvolvimento de sistemas de integração entre fontes (operacionalização e monitoramento). Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.			
		Maturidade	ALTO					

Fonte: Elaboração própria.

6.3.3. Temática correntes de marés e oceânicas

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática (ver Gráfico 37, Gráfico 38 e Gráfico 39).

Rotas - Turbina de eixo horizontal, turbina de eixo vertical e turbina canalizada ou de efeito Venturi

As linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas dizem respeito à otimização das turbinas e dos rotores, sob o ponto de vista da confiabilidade e da eficiência, e ao estudo com foco na construção de parque de geração submarino em escala piloto.

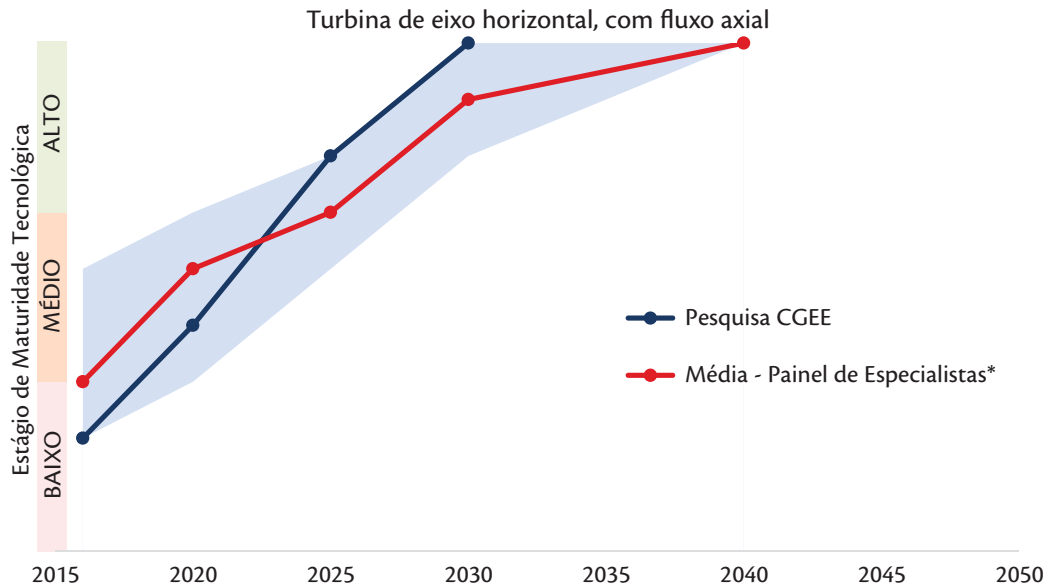


Gráfico 37 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Turbina de Eixo Horizontal, com Fluxo Axial

Fonte: Elaboração própria.

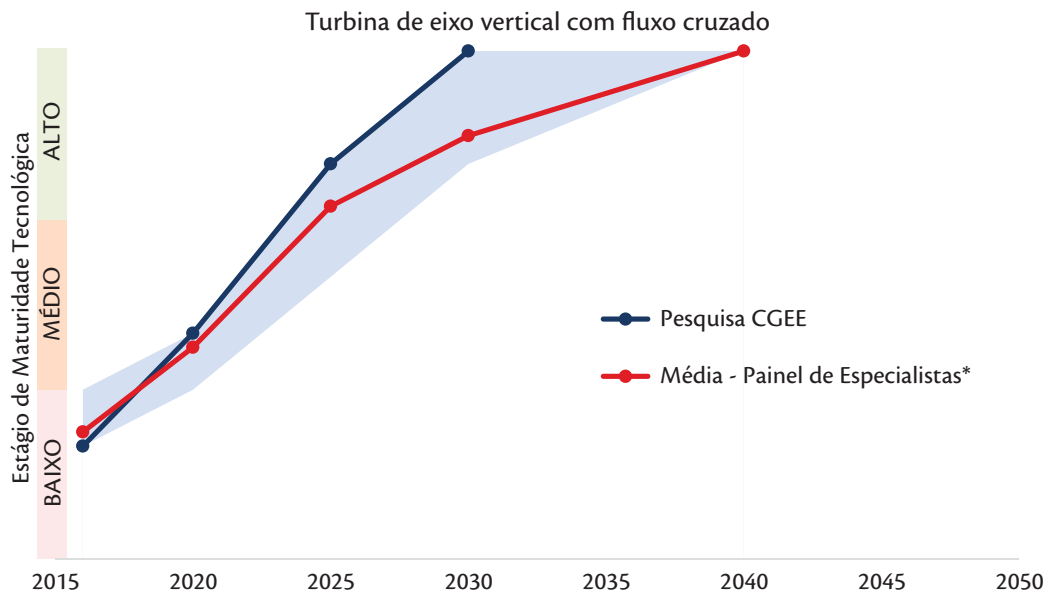


Gráfico 38 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Turbina de Eixo Vertical, com Fluxo Cruzado

Fonte: Elaboração própria.

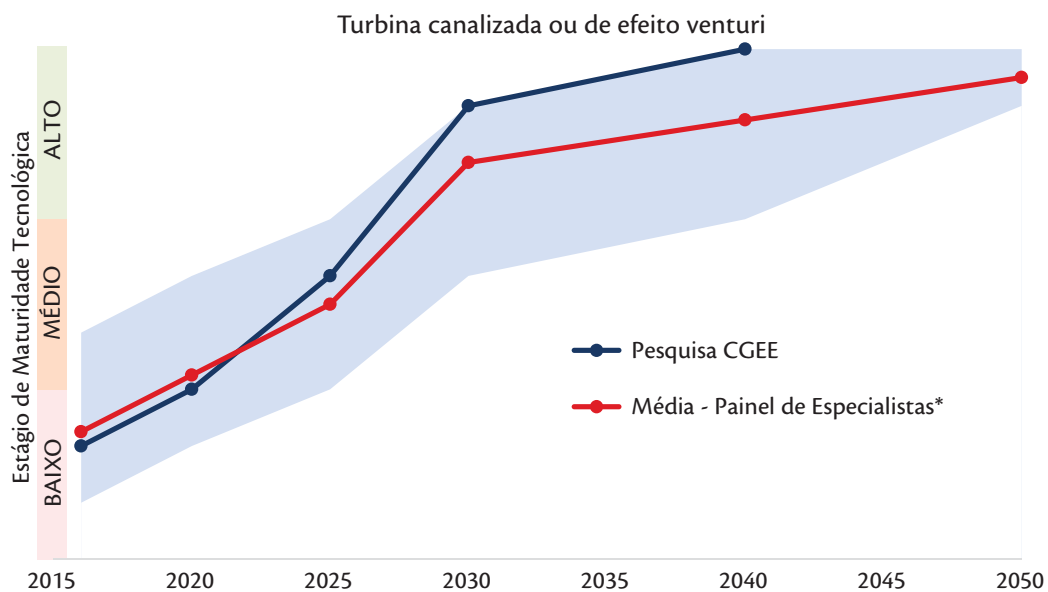


Gráfico 39 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Turbina Canalizada ou de Efeito Venturi

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 24.



Tabela 24 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Turbina de Eixo Horizontal com Fluxo Axial, Turbina de Eixo Vertical com Fluxo Cruzado e Turbina Canalizada com Efeito Venturi

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Correntes de marés e oceânicas	Turbina de eixo horizontal	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais R\$ (fomento), estudo do recurso energético, aumento da demanda energética, investimento em CT&I e cadeia produtiva	Novos desenhos de turbinas, desenvolvimento de sistemas de fixação, O&M e monitoramento	desenvolvimento de cabos submarinos, sistemas de armazenamento (foco no despacho). Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.			
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Turbina de eixo vertical	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais R\$ (fomento), estudo do recurso energético, aumento da demanda energética, investimento em CT&I e cadeia produtiva	Novos desenhos de turbinas, desenvolvimento de sistemas de fixação, O&M e monitoramento	desenvolvimento de cabos submarinos, sistemas de armazenamento (foco no despacho). Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.			
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Turbina de efeito venturi	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais R\$ (fomento), estudo do recurso energético, aumento da demanda energética, investimento em CT&I e cadeia produtiva	Novos desenhos de turbinas, desenvolvimento de sistemas de fixação, O&M e monitoramento	Novos desenhos de turbinas, desenvolvimento de cabos submarinos, sistemas de armazenamento (foco no despacho)	Novos desenhos de turbinas, desenvolvimento de cabos submarinos, sistemas de armazenamento (foco no despacho), protótipo em escala laboratorial	Protótipo tamanho real (aquisição de dados para otimização). Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia.	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

6.3.4. Temática gradiente de temperatura

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rotas - Conversores de energia térmica oceânica de ciclo aberto, conversores de energia térmica oceânica de ciclo fechado e conversores de energia térmica oceânica de ciclo híbrido

As linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas dizem respeito ao desenvolvimento de protótipos em escala operacional, com tecnologias nacionais, para estudos. Ver Gráfico 40, Gráfico 41 e Gráfico 42.

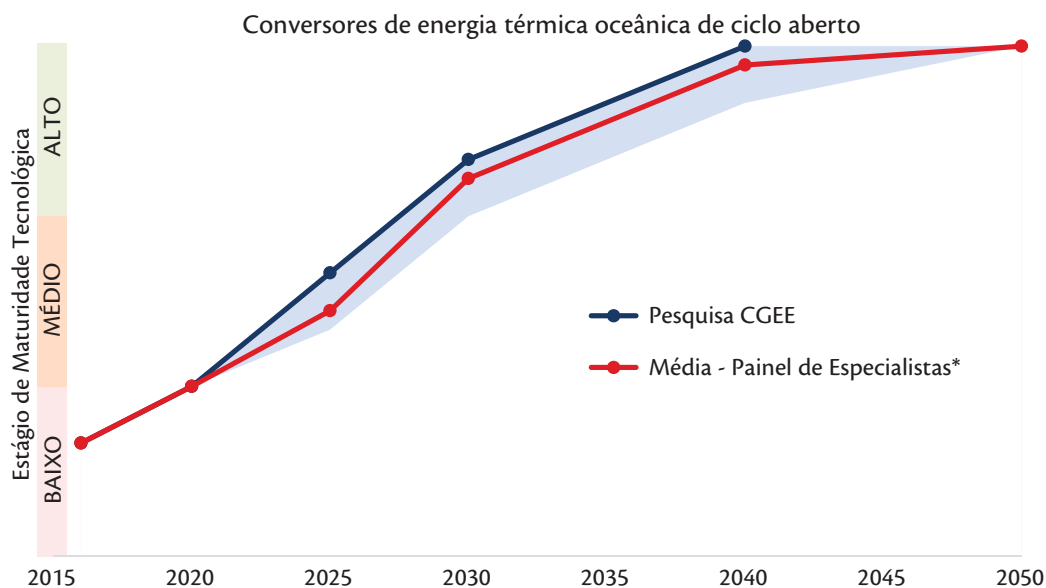


Gráfico 40 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Aberto

Fonte: Elaboração própria.

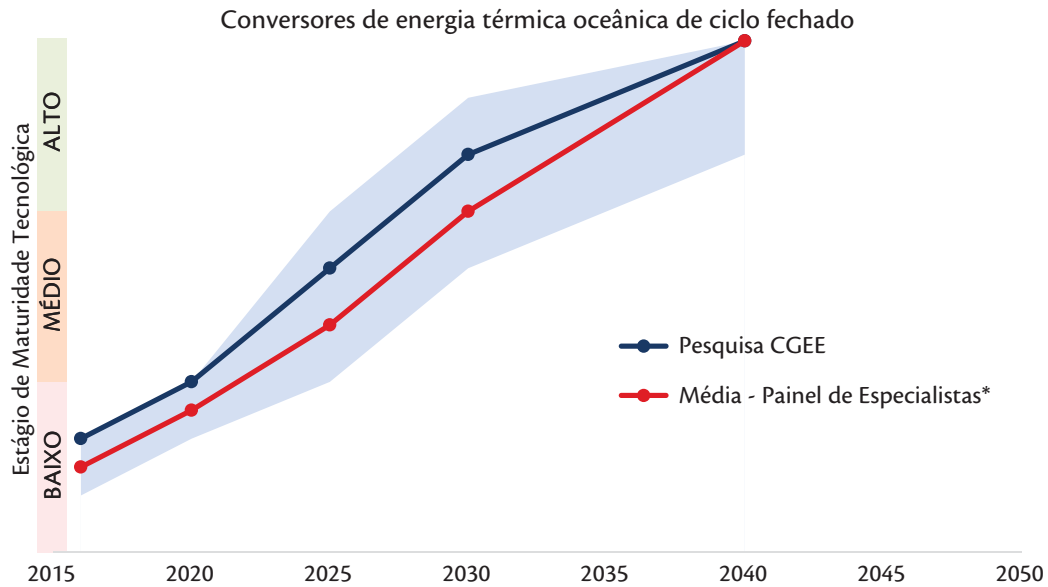


Gráfico 41 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Fechado

Fonte: Elaboração própria.

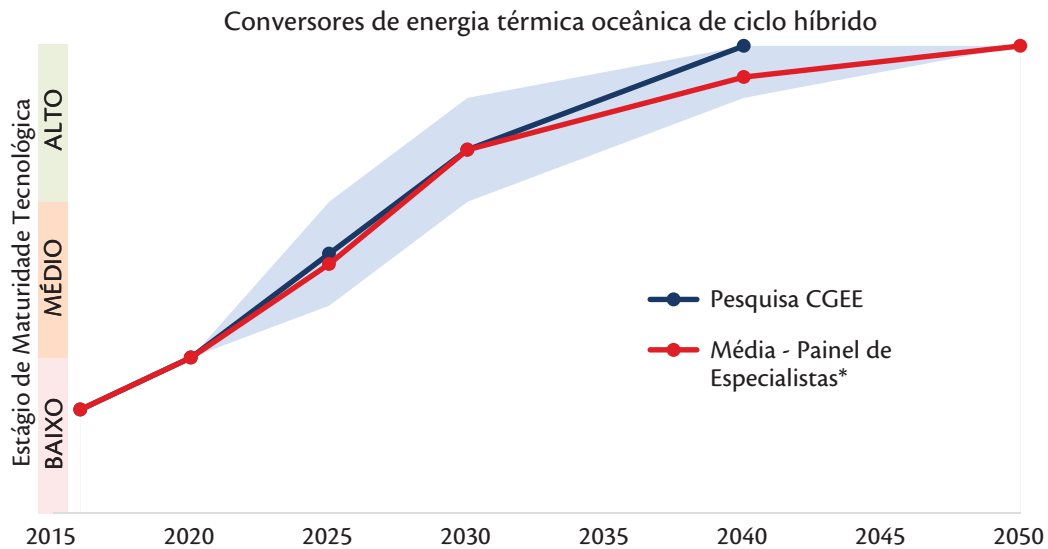


Gráfico 42 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Híbrido

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Aberto, Fechado e Híbrido

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Gradiente de temperatura	Conversor de ciclo aberto	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais (RS), investimento em CT&I e cadeia produtiva, estudo do recurso, estudos iniciais da tecnologia	Mapeamento do recurso, desenvolvimento da tecnologia de conversão, O&M, integração entre fontes e armazenamento de energia	Desenvolvimento de protótipo em escala laboratorial, desenvolvimento de transmissão submarina de energia elétrica	Desenvolvimento de protótipo em escala real, implantação de sistemas de O&M, monitoramento e integração entre fontes e armazenamento de energia	Desenvolvimento de protótipo em escala real, implantação de sistemas de O&M, monitoramento e integração entre fontes e armazenamento de energia	Desenvolvimento de sistemas de implantação das tecnologias e desenvolvimento de teste de comissionamento. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Conversor de ciclo fechado	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais (RS), investimento em CT&I e cadeia produtiva, estudo do recurso, estudos iniciais da tecnologia	Mapeamento do recurso, desenvolvimento da tecnologia de conversão, O&M, integração entre fontes e armazenamento de energia	Desenvolvimento de protótipo em escala laboratorial, desenvolvimento de transmissão submarina de energia elétrica	Desenvolvimento de protótipo em escala real, implantação de sistemas de O&M, monitoramento e integração entre fontes e armazenamento de energia	Desenvolvimento de protótipo em escala real, implantação de sistemas de O&M, monitoramento e integração entre fontes e armazenamento de energia	Desenvolvimento de sistemas de implantação das tecnologias e desenvolvimento de teste de comissionamento. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Conversor de ciclo híbrido	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais (RS), investimento em CT&I e cadeia produtiva, estudo do recurso, estudos iniciais da tecnologia	Mapeamento do recurso, desenvolvimento da tecnologia de conversão, O&M, integração entre fontes e armazenamento de energia	Desenvolvimento de protótipo em escala laboratorial, desenvolvimento de transmissão submarina de energia elétrica	Desenvolvimento de protótipo em escala real, implantação de sistemas de O&M, monitoramento e integração entre fontes e armazenamento de energia	Desenvolvimento de protótipo em escala real, implantação de sistemas de O&M, monitoramento e integração entre fontes e armazenamento de energia	Desenvolvimento de sistemas de implantação das tecnologias e desenvolvimento de teste de comissionamento. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.



6.3.5. Temática gradiente de salinidade

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade da rota tecnológica desta temática.

Rota - Energia osmótica

A linha de pesquisa que fundamenta a evolução da maturidade tecnológica da rota diz respeito ao desenvolvimento de protótipos em escala real com foco na otimização ou em melhorias tecnológicas para a redução dos custos das membranas semipermeáveis. Ver Gráfico 43.

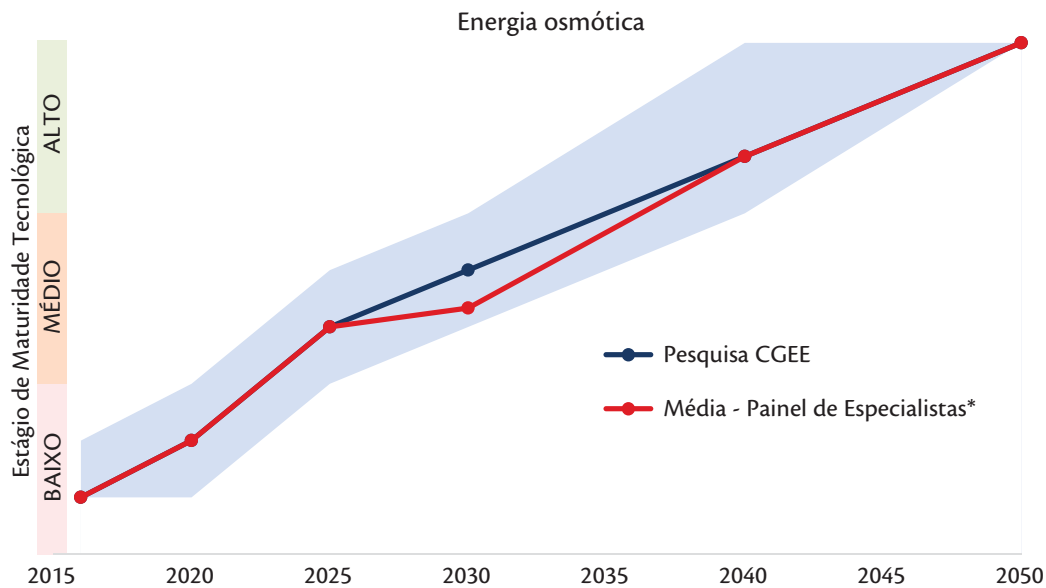


Gráfico 43 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Energia Osmótica

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade da respectiva rota são apresentados na tabela 26.

Tabela 26 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Aberto, Fechado e Híbrido

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Gradiente de salinidade	Energia osmótica	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais (R&D), investimento em CT&I e em cadeia produtiva, mapeamento do recurso, estudos iniciais (tecnologias de geração, implantação, O&M)	Desenvolvimento inicial de tecnologias (membrana semipermeável), aprimoramento dos sistemas de O&M, integração entre fontes e integração entre sistemas de armazenamento	Desenvolvimento de tecnologias (membrana semipermeável), aprimoramento dos sistemas de O&M, integração entre fontes e integração entre sistemas de armazenamento	Desenvolvimento de protótipos em escala laboratorial	Desenvolvimento de protótipos em escala real, aplicação de tecnologias de O&M, integração entre fontes e sistemas de armazenamento de energia	Desenvolvimento ou otimização de tecnologias de implantação. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo interupto com foco na redução dos custos de fabricação.
Maturidade			BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

6.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro.

Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas conforme apresentado na Tabela 27.



Tabela 27 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotécnica

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Sistema de corpo oscilante	Energia das ondas
2	Barragens de marés	Amplitude das marés
3	Turbina de eixo horizontal, com fluxo axial	Correntes de marés e oceânicas
4	Coluna de água oscilante	Energia das ondas
5	Turbina de eixo vertical com fluxo cruzado	Correntes de marés e oceânicas
6	Conversores de energia térmica oceânica de ciclo híbrido	Conversão da energia térmica
7	Conversores de energia térmica oceânica de ciclo aberto	Conversão da energia térmica
8	Conversores de energia térmica oceânica de ciclo fechado	Conversão da energia térmica
9	Energia osmótica	Gradiente de salinidade
10	Turbina canalizada ou de efeito Venturi	Correntes de marés e oceânicas
11	Acumulador de água do mar (reservatório), via movimento horizontal das ondas (<i>Overtopping</i>)	Energia das ondas

Fonte: Elaboração própria.

Os sistemas de geração de energia via tecnologia de corpo oscilante apresentam elevado nível de maturidade e os desenvolvimentos necessários à otimização ou ao aprimoramento dessa tecnologia são factíveis à CT&I nacional, haja vista a presença de um corpo técnico especializado e experiente em projetos sobre energia dos oceanos.

A mesma observação pode ser atribuída às tecnologias de geração de energia por meio das rotas barragens de marés, turbinas de eixo horizontal, coluna d'água oscilante e turbina de eixo vertical. É importante citar que a fonte oceânica na costa brasileira é considerada ideal para a implantação dessas tecnologias. Há duas questões pertinentes sobre o desenvolvimento dessa fonte no Brasil: i) o estudo do recurso ainda não está devidamente mapeado e caracterizado. O conhecimento das características do recurso oceânico possibilitará guiar os desenvolvimentos das respectivas rotas, levando-se em conta questões socioambientais e do mercado da energia (economicamente viável). E ii) a cadeia produtiva nacional precisa se estruturar, no sentido de dar aporte ao desenvolvimento e à manufatura dos componentes dos sistemas de geração, levando-se em conta os custos de fabricação e a qualidade dos produtos manufaturados.

Outro importante recurso disponível na costa nacional corresponde ao gradiente de energia térmica (temática; conversão da energia térmica). A rota conversores de energia térmica oceânica de ciclo híbrido é promissora ao País pela característica da própria fonte, que permite deltas de temperatura em torno de 22°C. O desenvolvimento dessa rota no Brasil agregará conhecimento e competitividade à tecnologia nacional.



Capítulo 7



Capítulo 7

Macrotemática Termoeletricidade Renovável e não Renovável

A estrutura da macrotemática sobre a qual serão direcionadas as considerações feitas nesse trabalho é caracterizada conforme apresentado na Figura 14.

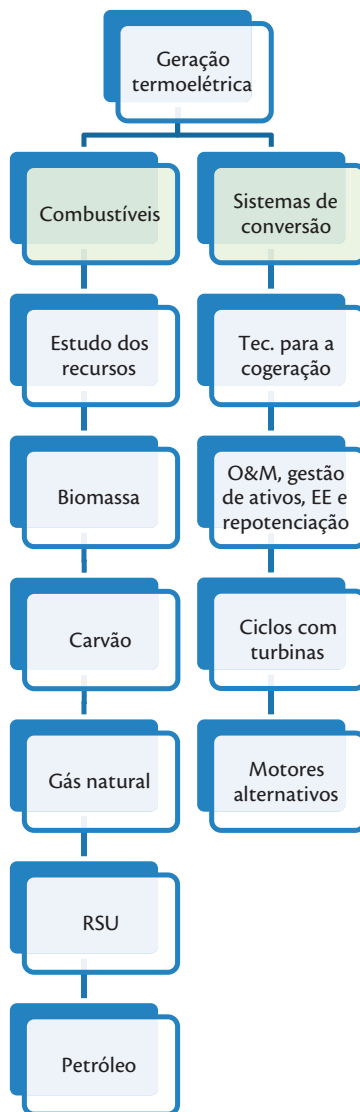


Figura 14 - Caracterização da macrotemática geração termoeétrica (Preenchimento na cor verde; temáticas. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.

O desenvolvimento de cada rota é importante ao setor termoeétrico. Desta forma, é possível prover uma variabilidade de fontes na produção de eletricidade, o que eleva a segurança do fornecimento de energia no Brasil. A termoeletricidade é considerada uma fonte segura e despachável e é a principal fonte complementar da geração hidroelétrica.



À vista disso, a utilização da biomassa será cada vez maior para fins de geração termoelétrica, contribuindo de forma importante na expansão do parque gerador elétrico brasileiro. A biomassa é utilizada hoje para a queima direta (bagaço de cana, palha, cavacos de madeira), mas seu beneficiamento poderia aumentar a eficiência global de conversão de energia.

O desenvolvimento de processos produtivos de biocombustíveis pode trazer benefícios importantes no que se refere à expansão do sistema gerador elétrico. A rota de conversão mais promissora é a chamada rota termoquímica, que se inicia com a gaseificação ou a pirólise da biomassa, obtendo-se o biogás ou o gás de síntese, que pode ser utilizado diretamente em turbinas a gás e em motores de combustão interna para a geração termoelétrica. Este gás de síntese pode ser processado (síntese catalítica ou fermentação) para a obtenção de biocombustíveis e de outros compostos.

Buscam-se novos combustíveis provenientes de biomassa (biogás, biodiesel ou etanol), sejam eles obtidos de fontes primárias, como o etanol, ou produzidos a partir de oleaginosas, como o biodiesel, com características semelhantes aos combustíveis líquidos comerciais.

No caso de combustíveis fósseis, o beneficiamento de combustível que tem o maior impacto sobre a geração termoelétrica é a gaseificação do carvão. As plantas que utilizam a Gaseificação Integrada com Ciclos Combinados apresentam maior eficiência energética que aquela conseguida pelas plantas convencionais de carvão pulverizado, com significativa redução na emissão de poluentes quando comparado com as tecnologias convencionais.

No caso do carvão brasileiro, com alto teor de cinzas, a tecnologia mais promissora é a Gaseificação em Leito Fluidizado. No processo em leito fluidizado, as interações entre fluidos e partículas dão-se com maior intensidade e o processo de gaseificação é mais completo. A temperatura do leito está abaixo da temperatura do ponto de fusão da escória, prevenindo aglomeração das partículas, sendo ideal para carvão com alto teor de cinzas.

Outra rota possível de beneficiamento de combustível fóssil é a chamada tecnologia Gas to Liquid (GTL), em que o gás de síntese, proveniente de gaseificação de carvão, de biomassa ou do próprio gás natural, é transformado em combustível líquido. O Processo Fischer-Tropsch é aquele de conversão de gás de síntese em uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos e oleofínicos de cadeia longa, que serão posteriormente processados para a obtenção dos combustíveis líquidos. A vantagem desta solução tecnológica é que os custos de transporte dos combustíveis líquidos são proporcionalmente muito menores do que os de transporte de gases.

No contexto de geração termoelétrica, motores de combustão interna são aqueles alternativos de grande porte que queimam gás natural, diesel e biocombustíveis para acionar geradores elétricos. Motores de combustão externa constituem-se de caldeiras (convencionais e supercríticas) que queimam biomassa, carvão mineral e resíduo sólido urbano, gerando vapor para a expansão em turbinas a vapor. Turbinas a gás são equipamentos que integram compressor, combustor e turbina para combustão de gás e de biocombustíveis.

O uso de motores de combustão interna de grande porte para a geração termoelétrica é uma rota tecnológica muito interessante para o Brasil. Além de ser um equipamento com tecnologia plenamente dominada, no caso do uso de diesel e de gás natural, existe um parque industrial e de manutenção com grande capilaridade, fazendo com que os custos de capital e de manutenção sejam relativamente baixos.

Uma vantagem competitiva do Brasil é o domínio da tecnologia de projeto e de fabricação de motores para a queima de biocombustíveis, que é um insumo renovável e abundante no País. Certamente existe espaço para melhorias na eficiência de conversão de energia e para a ampliação do leque de biocombustíveis que podem ser utilizados, resultando em possíveis tópicos de pesquisa e desenvolvimento com forte componente estratégico.

Parcela importante do aumento da capacidade de geração termoelétrica nos próximos anos estará associada ao aumento da capacidade de cogeração de biomassa e pelo uso de tecnologias avançadas para queima de carvão mineral e resíduos sólidos urbanos.

No caso da cogeração associada à indústria sucroalcooleira, existe um grande potencial de aumento da produção de energia elétrica pela utilização de outros insumos da indústria canavieira como a palha de cana-de-açúcar. Este insumo energético tornou-se importante por causa do aumento da mecanização na colheita de cana-de-açúcar, o que permitiu disponibilizar uma grande quantidade desse insumo, que tem poder calorífico bem maior do que o do bagaço de cana. O aumento da produção também pode ser obtido por meio do aumento da eficiência de conversão do Ciclo de *Rankine*, pelo uso de geradores de vapor com queima mais eficiente, como as que utilizam a tecnologia de leito fluidizado, e pela adoção de pressões maiores no ciclo.

O uso de carvão mineral e de resíduos sólidos urbanos para a geração termoelétrica também merece consideração, apesar de que estes insumos devem ter papel menor no aumento da capacidade instalada. Já as tecnologias avançadas para beneficiamento e queima de carvão mineral em geradores de vapor podem mitigar grande parte de seu impacto ambiental. A utilização do carvão é importante



por causa de seu baixo custo e pelas reservas existentes na região Sul do Brasil, sendo um combustível de importância regional.

No caso de resíduos sólidos urbanos, a tecnologia de queima está em desenvolvimento. Por outro lado, o uso desses insumos para a geração termelétrica pode ser uma forma de mitigar o seu impacto ambiental, muito importante principalmente em grandes aglomerados urbanos, que produzem enorme quantidade do produto.

O gás natural, o principal combustível para a turbina a gás, é um insumo importante para a geração termelétrica no Brasil, tanto pela sua abundância nas reservas do pré-sal, quanto pelo seu preço relativamente baixo no mercado de energia. No exterior, a expansão do parque gerador por meio de turbinas a gás normalmente se dá por meio da chamada cogeração não convencional, que viabiliza economicamente o empreendimento ao utilizar os rejeitos térmicos dos gases de combustão. A tecnologia para projeto e construção de turbinas a gás concentra-se em poucas indústrias no mundo e já pode ser considerada uma tecnologia madura. Ainda assim, existe espaço para desenvolvimento, por exemplo, de câmaras de combustão para a queima de biocombustíveis em turbinas a gás.

Nesse contexto de turbinas a gás, uma forma de uso do carvão para a geração de eletricidade de forma limpa é a chamada Gaseificação Integrada com Ciclos Combinados (*Integrated Gasification Combined Cycle* - IGCC). Este tipo de processo apresenta maior eficiência energética que aquela conseguida pelas plantas convencionais de carvão pulverizado, com significativa redução na emissão de poluentes quando comparado com tecnologias convencionais.

7.1. Visão de futuro

7.1.1. Cenário setorial

Dentre as premissas macroeconômicas básicas, a indicação da redução gradativa da participação da indústria no PIB é a que mais preocupa. Segundo esta premissa, o Brasil já passou a ter uma economia “pós-industrial”, sem que tivesse se industrializado efetivamente. O crescimento da indústria nacional de alto conteúdo tecnológico é essencial para o desenvolvimento do País.

Por outro lado, a elevação do padrão de vida da população deverá elevar proporcionalmente a demanda por energia elétrica *per capita*.

A geração termelétrica terá papel importante na expansão do parque gerador elétrico no Brasil. Considerando-se a necessidade de aumento da capacidade instalada para cerca de 450 GW em 2050, e o limite inventariado do potencial hidroelétrico de 170 GW, pode-se afirmar que a geração termelétrica deverá suprir parcela considerável desse acréscimo.

Os sistemas de geração que fazem uso de energias solar e eólica, apesar de se tornarem cada vez mais importantes no cenário de expansão, ainda apresentam problemas de escala, competitividade econômica e intermitência no fornecimento. Assim, as gerações hidroelétrica e termelétrica deverão suprir grande parcela da expansão do parque gerador elétrico até 2050.

O desenvolvimento do mercado de gás natural, o aumento da produção nacional de petróleo, a expansão do parque cogedor utilizando a biomassa, a produção de combustíveis líquidos e gasosos a partir do combustível fóssil e da biomassa e o uso do carvão mineral e de resíduos sólidos urbanos serão a base desse aumento da geração termelétrica.

7.1.2. Objetivo geral

As pesquisas na área de geração termelétrica (SIN, cogeração, isolados e GD) devem focar no uso do gás natural, da biomassa, do carvão e de RSU no sistema elétrico brasileiro por meio de tecnologias avançadas, levando-se em conta o aumento da eficiência e a mitigação das emissões. Também é foco da PD&I o desenvolvimento ou a otimização de tecnologias com o papel de fornecer flexibilidade operativa ao sistema, tendo a importante função na garantia das condições de suprimento para o beneficiamento de insumos energéticos.

7.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes.

Curto Prazo (2017-2020)

- Estudos de avaliação do potencial de insumos energéticos para a geração termoelétrica, e a logística para a disponibilização desses insumos;
- Estudo voltado à otimização de tecnologias de cogeração.



Médio Prazo (2020-2030)

- Desenvolvimento e/ou aprimoramento de tecnologias de beneficiamento da biomassa, de resíduos sólidos urbanos e de combustíveis fósseis com foco na diversificação das formas de energias intermediárias e em otimizar os custos de produção e de transporte;
- Desenvolvimento e/ou melhoramento de tecnologias de conversão termoquímica do insumo energético em termoeletricidade, em especial tecnologias relacionadas à biomassa (grande porte e GD), gás natural, carvão, biogás de resíduos sólidos urbanos e outros fósseis;
- Desenvolvimento e/ou otimização das tecnologias de O&M, gestão de ativos, eficiência energética e repotenciação em geração e cogeração termoeletrica;
- Desenvolvimento e/ou otimização de tecnologias de produção descentralizada de combustíveis (conceito da Oferta Descentralizada de Energia);
- Desenvolvimento de novas tecnologias para térmica de partidas rápidas mais eficientes e econômicas (objetivo de flexibilidade operativa);
- Customização de tecnologias existentes de controle de emissões e captura de carbono;
- Desenvolvimento de tecnologia de recuperação de passivos ambientais, especialmente em térmicas a carvão.

Longo Prazo (2030-2050)

- Desenvolvimento de tecnologias para descomissionamento das usinas obsoletas.

7.1.4. Fundamentação

Sem dúvida, o aumento da capacidade de geração termelétrica deverá ser significativo nos próximos anos. Esse aumento deve-se principalmente ao maior uso de insumos não renováveis com menor impacto ambiental, como o gás natural, a elevação da capacidade de cogeração de biomassa, o uso de tecnologias avançadas para a queima de carvão mineral e de resíduos sólidos urbanos e o desenvolvimento de novas tecnologias para a produção e o uso de combustíveis renováveis.

No caso do uso de gás natural, a tendência mundial é associá-lo à cogeração não convencional, o que viabiliza economicamente o empreendimento ao utilizar os rejeitos térmicos dos gases de combustão. No caso do Brasil, existe ainda um grande gargalo no escoamento do gás natural do pré-sal, por causa das grandes distâncias entre os poços produtores e a costa brasileira.

Quanto às tecnologias de geração termelétrica, apesar de a maioria dos equipamentos utilizados em usinas que operam com turbinas a vapor ou com turbinas a gás já serem tecnologicamente maduros, existe espaço para avanços visando ao aumento da eficiência da conversão de energia. Este tópico é particularmente relevante no caso da tecnologia de combustão de carvão mineral e de resíduos sólidos urbanos.

No caso de combustíveis renováveis, existe a necessidade de serem realizadas pesquisas na área de combustão de biodiesel e de bioetanol para turbinas a gás e para motores de combustão interna de grande porte. No caso de turbinas a gás, esta questão torna-se complexa, uma vez que a tecnologia para projeto e fabricação de turbinas a gás está concentrada em poucas empresas multinacionais. Este problema não existe no caso de motores de combustão interna de grande porte, o que poderia propiciar o desenvolvimento de produtos nacionais para uso dos resultados obtidos em pesquisas na área.

Um setor que merece atenção é a cogeração associada à indústria sucroalcooleira. Existe um grande potencial de aumento da produção de energia elétrica pela utilização de outros insumos da indústria canavieira, pelo uso de geradores de vapor mais eficientes e pela adoção de ciclos de turbina a vapor com pressões maiores.

A geração termelétrica a partir de floresta energética também é uma área de grande interesse. Neste caso, a questão maior é o aperfeiçoamento de tecnologias existentes para melhor aproveitamento energético da madeira. Resíduos da indústria madeireira e moveleira também são insumos importantes que poderiam ser considerados para a geração distribuída.

Podem-se considerar também os processos produtivos de biocombustíveis como tópicos de desenvolvimento importantes desta macrotemática. Buscam-se novos combustíveis provenientes de biomassa (biogás, biodiesel ou etanol), sejam eles obtidos de fontes primárias, como o etanol, ou produzidos a partir de oleaginosas, como o biodiesel. Além disso, processos como a gaseificação da biomassa e posterior processamento para a obtenção de combustível líquido (tecnologia *Biomass to Liquid* - BTL) também necessitam de estudos adicionais.



7.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática geração termoelétrica foi caracterizado em resposta a um conjunto de métricas (ver Anexo) que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo, levando-se em conta o período de tempo até 2050.

Sobre a evolução tecnológica, as métricas associadas a essa questão são caracterizadas tal qual apresentado a seguir:

- Capacidade instalada de geração termoelétrica: a expansão da capacidade instalada por meio da geração termoelétrica ocorrerá em todas as etapas previstas para o futuro, pois esta forma de geração de energia elétrica é a que tem menor ciclo e custo de implantação dentre as alternativas para fornecimento da energia elétrica não intermitente.
- Eficiência de conversão de energia: o aumento da eficiência também ocorrerá em todas as etapas previstas para o futuro, pois o atual modelo do mercado de energia elétrica favorece o investimento em equipamentos de conversão de energia cada vez mais eficientes, tanto nas plantas novas quanto na renovação do parque gerador existente.
- Desenvolvimento da indústria nacional de equipamentos: o aumento do conteúdo nacional dos equipamentos é uma política que tem sido adotada pelo governo federal nos últimos anos e tem tido efeitos benéficos para o País tanto do ponto de vista econômico, quanto estratégico, contanto que seja implantada adequadamente. O parque industrial brasileiro tem potencial para ser muito pujante e necessita de apoio governamental para a sua expansão e capacitação tecnológica.

De uma forma macro, as métricas indicam que todos os desenvolvimentos realizados promoverão a expansão da capacidade instalada, o aumento da eficiência de conversão e também o aumento do conteúdo nacional dos equipamentos.

As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado estão apresentadas na planilha de indicadores, conforme instruções constantes na própria planilha. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias, as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e setor elétrico brasileiro

potencializam a melhoria ou a participação dessas questões no setor elétrico brasileiro, com impacto positivo sobre o desenvolvimento das rotas tecnológicas.

7.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associadas aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta: i) as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas; e ii) os fatores portadores de futuro que suportam essa evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

7.3.1. Temática combustíveis

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota – Biomassa

As linhas que fundamentam o desenvolvimento dessa rota dizem respeito ao desenvolvimento de tecnologias novas ou otimizadas para a produção de biogás a partir da gaseificação da biomassa em leito fluidizado (gaseificação pressurizada ou atmosférica etc.) e ao desenvolvimento de tecnologias novas ou otimizadas para a produção de bio-óleo a partir da pirólise da biomassa (pirólise rápida e ultrarrápida). Ver Gráfico 44.

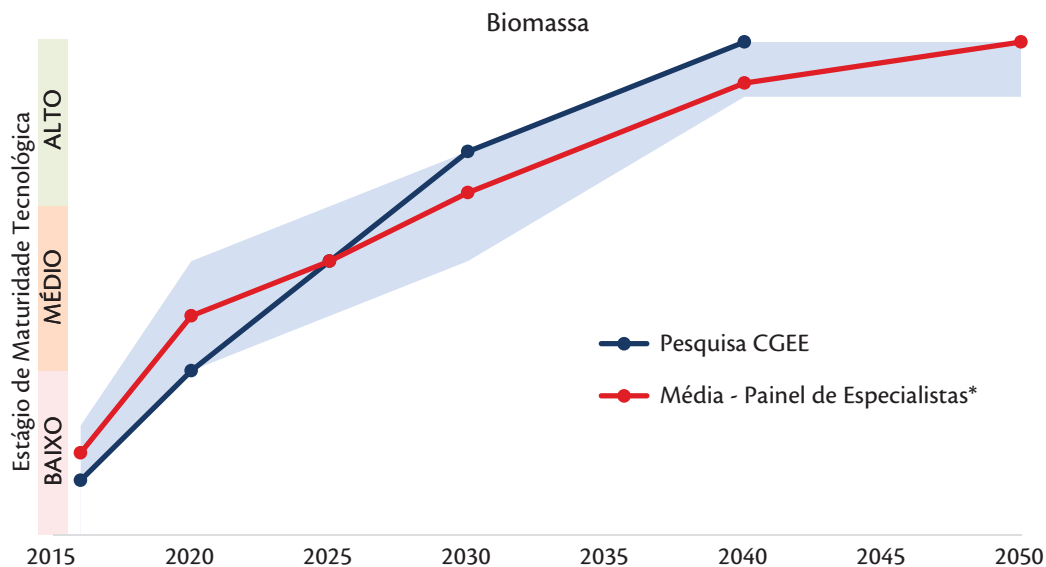


Gráfico 44 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Biomassa

Fonte: Elaboração própria.

Rota – Carvão

Para essa rota, as linhas de pesquisa dizem respeito ao aprimoramento dos processos de gaseificação via leito fluidizado para a produção de gás de síntese (focos: custos do processo e qualidade do insumo energético) e via ciclo combinado (produção simultânea de eletricidade, gás de síntese e hidrogênio). Ver Gráfico 45.

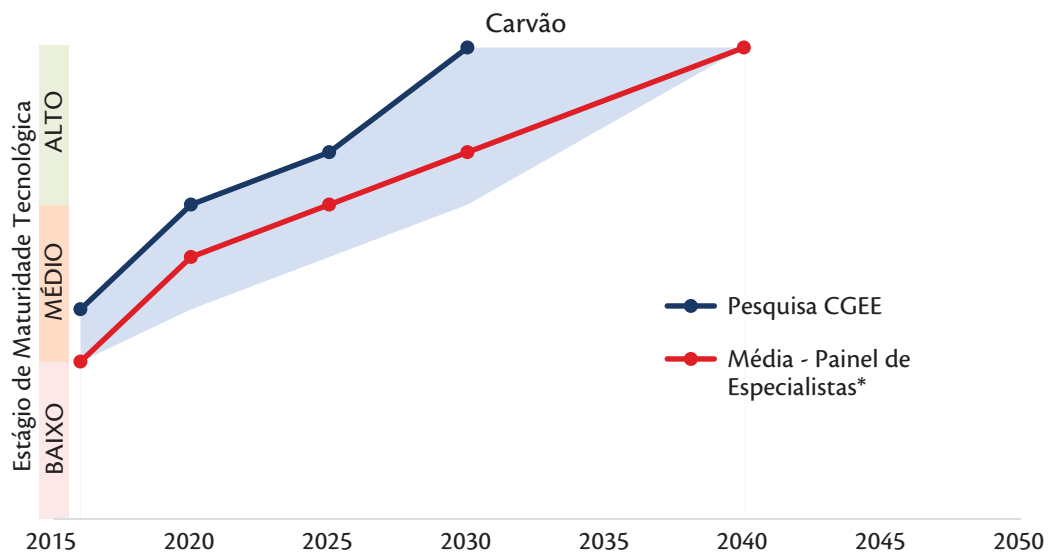


Gráfico 45 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Carvão

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Gás natural

Aprimoramento do processo Fischer-Tropsch para a produção de combustíveis líquidos a partir do gás natural. Ver Gráfico 46.

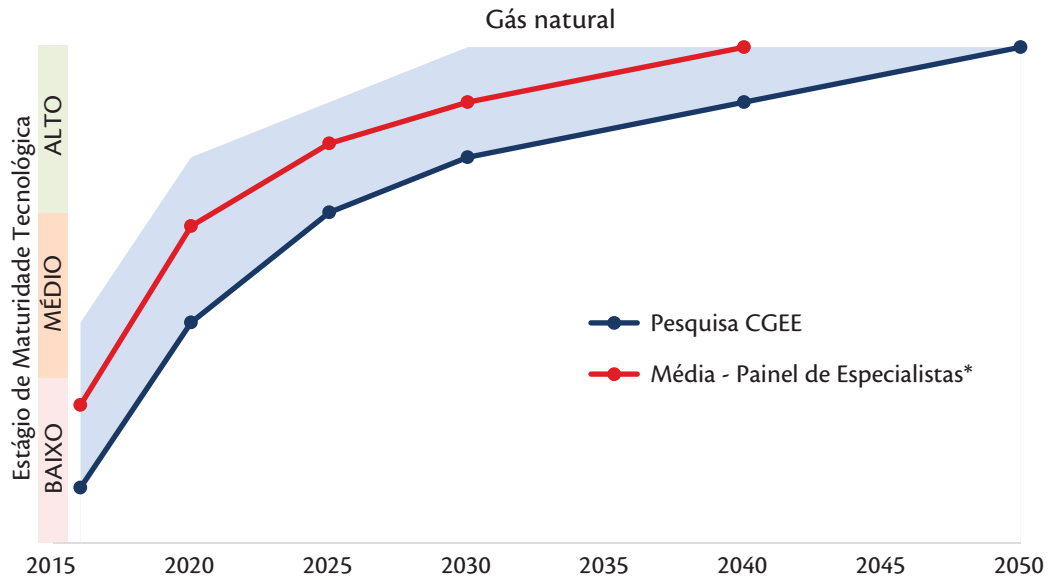


Gráfico 46 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Gás Natural

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Biomassa, Carvão e Gás Natural

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Combustíveis	Biomassa	Fatores portadores de futuro	Caracterização avançada do recurso energético e fomento ao desenvolvimento à CT&I, à produção da biomassa e à cadeia de beneficiamento desse insumo	Tecnologias de beneficiamento da biomassa e tecnologias de logística da biomassa em desenvolvimento	Tecnologias de transformação da biomassa em combustíveis de maior densidade energética em desenvolvimento	Tecnologias avançadas de armazenamento e transporte da biomassa, tecnologias avançadas que permitam o uso da biomassa na GD e tecnologias avançadas de produção de combustíveis novos a partir da mistura da biomassa com outros insumos energéticos	Fomento à melhoria contínua da qualidade energética da biomassa e seus combustíveis derivados	Fomento à melhoria contínua da qualidade energética da biomassa e seus combustíveis derivados. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		
	Carvão	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I nacional e à cadeia produtiva do carvão e técnicas avançadas para o mapeamento desse insumo energético no BR	Tecnologias avançadas de beneficiamento do carvão e produção de outros combustíveis	Tecnologias de materiais para uso em turbinas críticas e supercríticas	Novas turbinas críticas e supercríticas em fase de protótipo	Métodos e tecnologias de implantação fundamentados e em uso. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota	
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			
	Gás natural	Fatores portadores de futuro	Estudo da aplicação do gás natural na GD	Desenvolvimento da GD e da logística do gás nesse ambiente	Planejamento de diversificação do uso do gás na GD	Motores de elevada performance desenvolvidos para o uso do gás natural na cadeia produtiva	Evolução contínua dos conversores de energia	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota.
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.



Rota - Petróleo e derivados

Nesse contexto, as linhas dizem respeito à aplicação de tecnologias Gás para Líquido (GTL) para o desenvolvimento de derivados adequados às futuras especificações de combustíveis. Ver Gráfico 47.

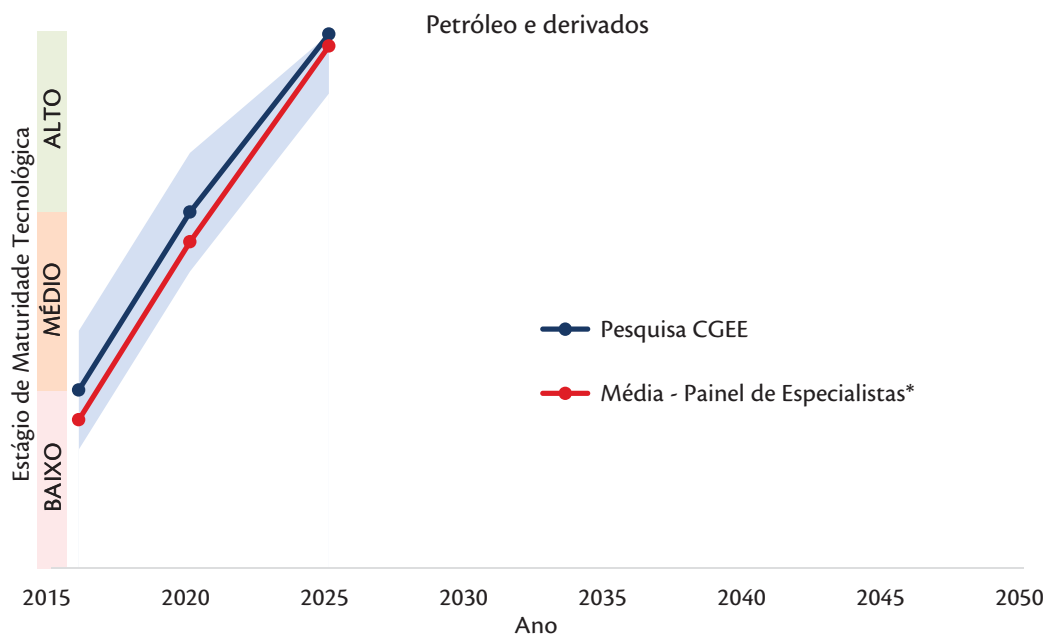


Gráfico 47 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Petróleo - Novas Tecnologias de Transformação do Insumo

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Resíduos sólidos urbanos

Desenvolvimento de tecnologias para a produção de biogás em aterros sanitários, levando-se em conta processos para mitigar a emissão de metano (tecnologia de plasma para a queima de resíduos sólidos urbanos e geração de biogás). Ver Gráfico 48.

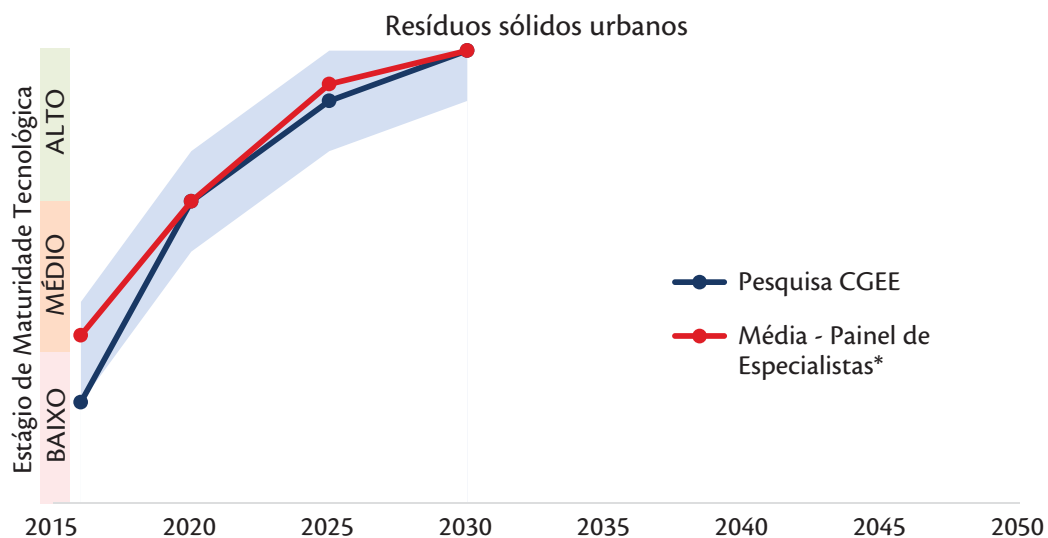


Gráfico 48 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Resíduo Sólidos Urbanos

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Estudo dos recursos (foco, planejamento da aplicação)

Otimizar o uso de combustíveis complementares (biomassa e não renováveis) para reduzir a sazonalidade e mapear o uso de tecnologias de cogeração e aplicadas à GD, para o uso, principalmente, do gás natural (geração combinada de eletricidade, calor e frio). Ver Gráfico 49.

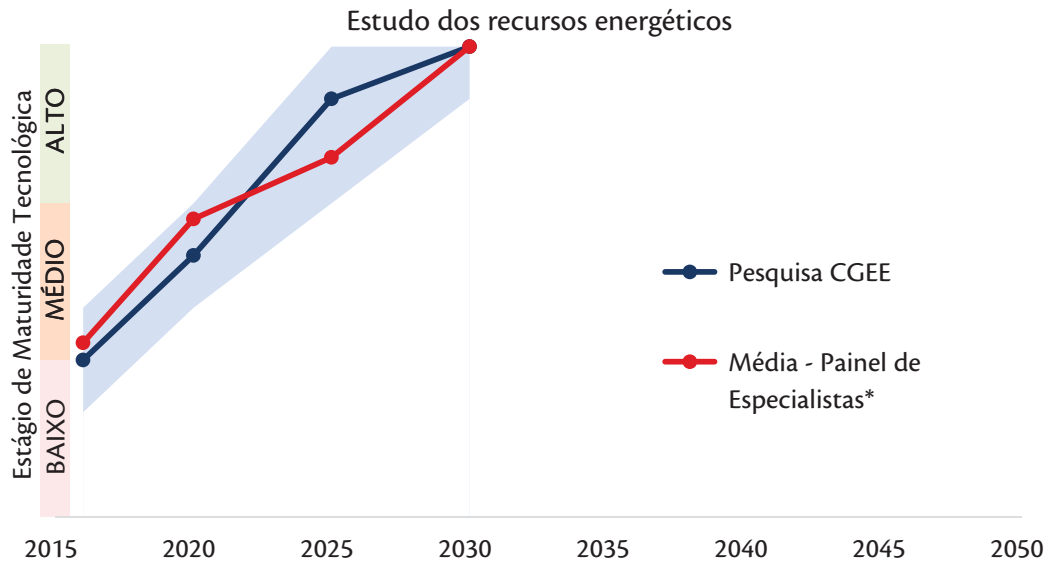


Gráfico 49 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudo dos Recursos Energéticos

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Petróleo, RSU e Estudo dos Recursos

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Combustíveis	Petróleo e derivados	Fatores portadores de futuro	Planejamento a longo prazo da exploração do petróleo consolidado. Garantia do aporte contínuo à CT&I e à cadeia produtiva. Prospecção de novos mercados em desenvolvimento e novas tecnologias de beneficiamento e transformação do insumo em curso	Fomento contínuo às pesquisas sobre a cadeia de transformação e uso do petróleo				
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			
	RSU	Fatores portadores de futuro	Políticas do uso do RSU consolidadas (considerando a GD), CT&I e cadeia produtiva em processo de desenvolvimento e desenvolver técnicas e tecnologias eficientes de manejo do recurso (classificação, separação, tratamento e transformação dos resíduos).	GD em desenvolvimento, protótipos em escala real de sistemas de classificação e processamento dos RSU para a geração de combustíveis e protótipos em escala real de sistemas de conversão de energia, apropriados ao uso dos novos combustíveis.	CT&I, cadeia produtiva e sistemas de GD consolidados e ativos, tecnologias de classificação, separação, tratamento e transformação do RSU em outros combustíveis consolidadas (maduras) e em operação.	Política para a manutenção do uso do RSU no setor elétrico e desenvolvimento contínuo das tecnologias envolvidas	Política para a manutenção do uso do RSU no setor elétrico e desenvolvimento contínuo das tecnologias envolvidas	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	Estudo dos recursos	Fatores portadores de futuro	Garantia do fomento à CT&I e cadeia produtiva. Normas e leis que fomentem o desenvolvimento da biomassa no Brasil ativas e eficientes, desenvolvimento de tecnologias de processamento e transformação dos insumos energético em fase avançada	Aplicação das tecnologias de processamento e transformação de insumos em fase de testes finais. Mapeamento e caracterização dos recursos energéticos em fase final de desenvolvimento	Sistemas de logística e armazenamento de insumos ativos. Caracterização e mapeamento do insumos energéticos consolidados	Fomento contínuo ao desenvolvimento de novos combustíveis		
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			

Fonte: Elaboração própria.



7.3.2. Temática sistemas de conversão

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Sistemas de cogeração

Desenvolvimento e/ou otimização de tecnologias de integração para o uso combinado de ciclo a vapor em sistemas de cogeração com ciclos de gaseificação (busca pela eletricidade competitiva) e otimização e/ou aprimoramento de sistemas de cogeração e trigeração (ver Gráfico 50).

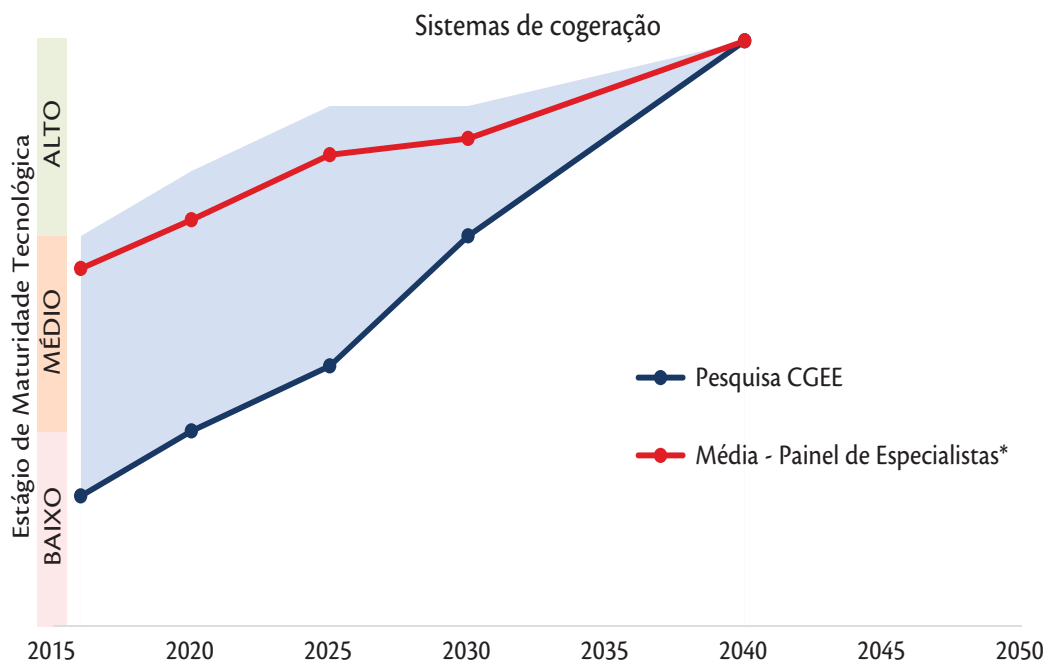


Gráfico 50 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas de Cogeração

Fonte: Elaboração própria.

Rota - O&M, gestão de ativos, eficiência energética e repotenciação

As linhas de P&D que fundamentam a evolução da respectiva rota dizem respeito à análise técnico-econômica do aumento de capacidade instalada de geração elétrica por meio da repotenciação de usinas hidrelétricas existentes, além do desenvolvimento de tecnologias de O&M e gestão de ativos. Ver Gráfico 51.

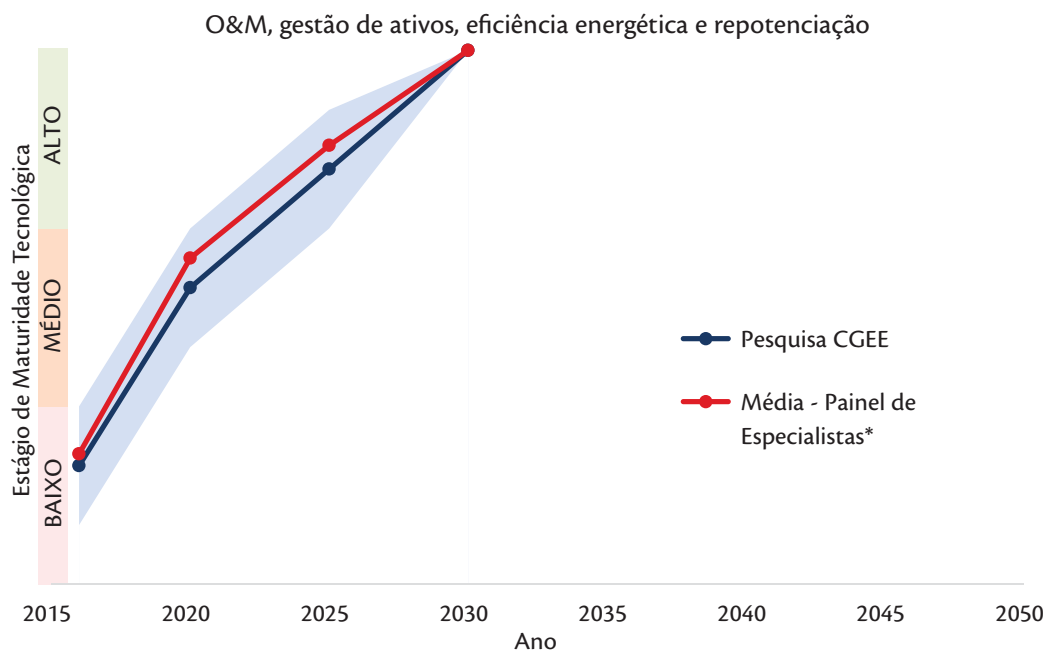


Gráfico 51 - Evolução da maturidade tecnológica da rota O&M, gestão de Ativos, Eficiência Energética e Repotenciação

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Ciclos com turbinas

Desenvolvimento tecnológico e otimização de caldeiras de carvão pulverizado, supercríticas e ultracriticadas, e desenvolvimento de tecnologias de integração para o uso combinado de turbinas a gás e outras fontes como a solar, na GD, e para o uso combinado de turbinas a gás e sistemas de armazenamento de energia como Caes (ver Gráfico 52).

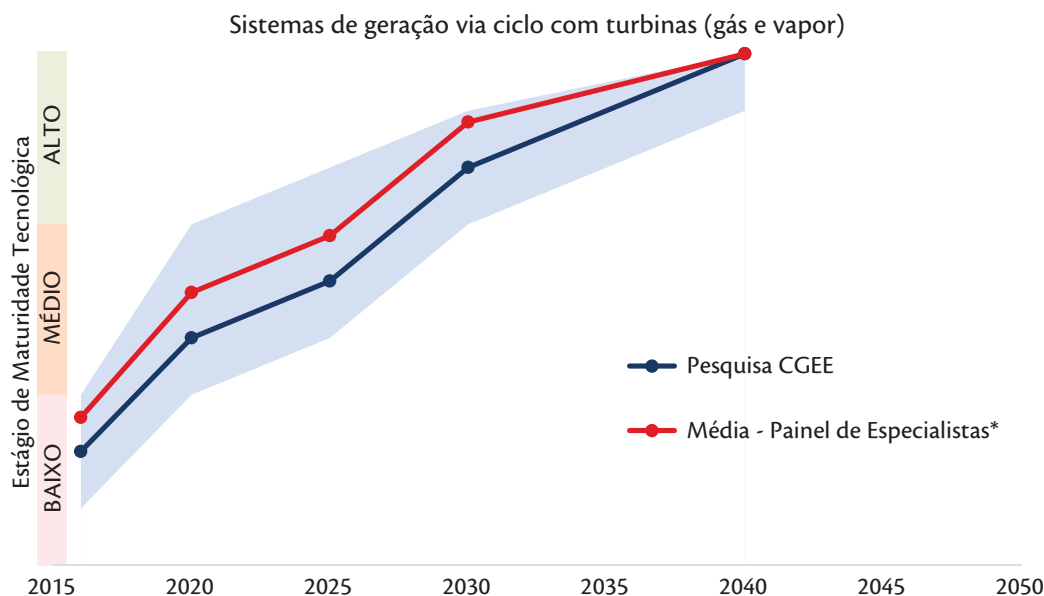


Gráfico 52 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas de Geração Via Ciclo a Turbinas (gás e vapor)

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Motores alternativos

- Desenvolvimento de motores Otto de elevada performance, de natureza *downsizing* (PME > 30 bar, uso de etanol e sistema flex - etanol e gás), via estratégias de otimização do processo de mistura ar/combustível, com foco na obtenção de uma mistura homogênea e uniforme, e via desenvolvimento de novos materiais com elevada resistência à fadiga térmica e mecânica (ver).

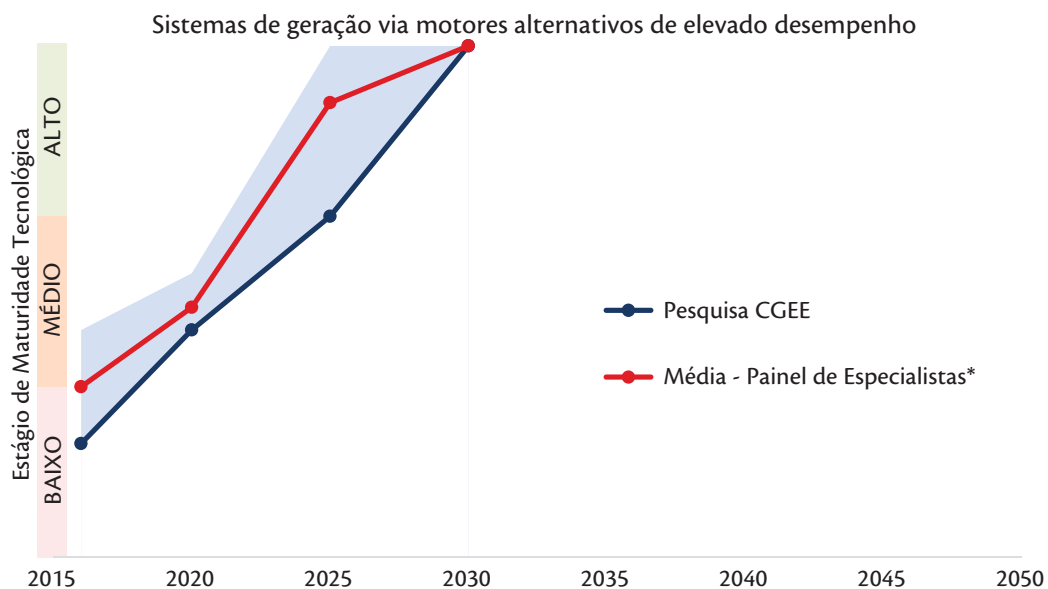


Gráfico 53 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas de Geração Via Motores Alternativos de Elevado Desempenho

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 30.



Tabela 30 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistemas de cogeração, O&M, gestão de ativos, EE e repotenciação, sistemas de geração via ciclo a turbinas (gás e vapor) e sistemas de geração via motores alternativos de elevado desempenho

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Sistemas de conversão	Tec. pac. a cogeração	Fatores portadores de futuro	Políticas com foco no desenvolvimento dos sistemas de cogeração (cogeração na indústria, GD, sistemas rurais e regiões remotas) e desenvolvimento contínuo das tecnologias de integração entre fontes e sistemas de conversão de energia	Repotenciação da cadeia de CT&I e produtíveis, desenvolvimento da GD e desenvolvimento contínuo das tecnologias de integração entre fontes e sistemas de conversão de energia	Sistemas de cogeração, O&M, monitoramento e sistemas de integração entre fontes e tecnologias de armazenamento de energia em fase final de desenvolvimento (testes e homologação).	Desenvolvimento contínuo das tecnologias de conversão de energia, filtros de particulados e catalizadores de elevada eficiência em desenvolvimento. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo para o uso dos sistemas de cogeração	Indústria, GD e demais beneficiários da cogeração 100% disponíveis para a implantação dos sistemas de cogeração. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	O&M, gestão de ativos, EE e repotenciação	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e cadeia produtiva consolidados. Estudos avançados sobre sistemas de O&M, gestão de ativos, eficiência energética em usinas termoeletricas e repotenciação de usinas	Estudos econômicos sobre o custo da repotenciação e aplicação de práticas de eficiência energética avançadas. Tecnologias de O&M e monitoramento em fase de protótipo para operação real	Sistemas de O&M e monitoramento, técnicas de gestão de ativos e de prospecção de ações de eficiência energética concluídos	Fomento contínuo ao desenvolvimento de métodos e tecnologias de gestão de ativos, O&M e monitoramento e repotenciação de usinas		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	Ciclos com turbinas	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e cadeia produtiva consolidados, metas de emissões de particulados para a geração termoeletrica definidas.	Tecnologias do uso do carvão pulverizado em testes, tecnologias de caldeiras supercríticas em testes e novos materiais desenvolvidos. Fomento à busca contínua pelo aumento da eficiência termodinâmica nos processos de conversão de energia e filtros de particulados e catalizadores de elevada eficiência em desenvolvimento	Tecnologias de turbinas a gás de baixa emissão de Nox em testes, filtros de particulados e catalizadores de elevada eficiência em desenvolvimento, tecnologias de integração entre fontes e integração com tecnologias de armazenamento de energia em testes. Fomento à busca contínua pelo aumento da eficiência termodinâmica nos processos de conversão de energia	Tecnologias de integração entre fontes e com sistemas de armazenamento de energia consolidadas, tecnologias de queima do carvão, turbinas de baixo Nox, filtros e catalizadores em operação. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo para o uso de tecnologias de turbinas.	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	Motores alternativos	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e cadeia produtiva consolidados, metas de emissões de particulados para a geração termoeletrica definidas.	Novos materiais desenvolvidos, GD em desenvolvimento, novos combustíveis em desenvolvimento, motores de elevada eficiência de natureza flexível para o uso de combustíveis em fase de testes	Planejamento contínuo da aplicação dos motores no setor (principalmente GD e no setor industrial - geração de eletricidade e força motriz)	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			

Fonte: Elaboração própria.

7.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro.

Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas conforme apresentado na Tabela 31.

Tabela 31 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Biomassa	Combustíveis
2	Estudo dos recursos	Combustíveis
3	Sistemas de geração via ciclo com turbinas (gás e vapor)	Sistemas de conversão
4	Tecnologias para a cogeração	Sistemas de conversão
5	Gás natural	Combustíveis
6	O&M, gestão de ativos, EE e repotenciação	Sistemas de conversão
7	RSU	Combustíveis
8	Carvão	Combustíveis
9	Sistemas de geração com motores alternativos	Sistemas de conversão
10	Petróleo	Combustíveis

Fonte: Elaboração própria.

A geração termelétrica responderá por parcela significativa do aumento da capacidade instalada de geração de energia elétrica nos próximos anos. Neste caso, o estudo do recurso é uma ação fundamental para a garantia do uso da termoelectricidade no setor elétrico.

Dentre as várias alternativas tecnológicas existentes para a realização desta expansão, devem-se destacar as seguintes, pelo seu potencial e economicidade:



- Uso de Ciclos de Turbinas a Vapor com queima limpa de biomassa (bagaço de cana, palha de cana, madeira) e de carvão mineral;
- Uso de Ciclos de Turbinas a Gás e Ciclos Combinados com queima de gás natural e gases provenientes de processos de gaseificação de biomassa e carvão mineral;
- Uso de Motores de Combustão Interna de Grande Porte e Alto Rendimento com queima de biocombustíveis líquidos.

Essas alternativas utilizam combustíveis abundantes e de baixo custo. O impacto ambiental já terá sido parcialmente mitigado, no caso de biomassa e de biocombustíveis. No caso de combustíveis fósseis, o impacto ambiental também poderá ser reduzido caso sejam utilizadas tecnologias de beneficiamento de combustível e sistemas de combustão adequados.

Além dessas questões, é necessário considerar o planejamento adequado da produção e da logística e o uso dos combustíveis, principalmente da biomassa e do gás natural, além da sazonalidade presente nas demais fontes de geração. A priorização do uso desses insumos ocorre pela abundância, variabilidade, produção de outros insumos energéticos (biomassa) e disponibilidade.



Capítulo 8



Capítulo 8

Macrotemática Hidrogênio e Célula a Combustível

A tecnologia de hidrogênio ainda necessita de muitos estímulos para que a sua inserção no mercado *time to market* seja acelerada.

Entre esses estímulos, o principal ponto é o custo do combustível hidrogênio e a sua logística de distribuição. A tecnologia das células teve um grande avanço na última década, mas o custo ainda precisa cair para que ela se torne mais competitiva e a durabilidade precisa ser elevada. Novos materiais e processos necessitam ser desenvolvidos.

Outras tecnologias de célula a combustível, como a *Solid Oxid Fuel Cell* (SOFC) e a *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC), têm tido grande destaque, pois permitem a utilização de gás natural, de biogás de aterro sanitário e de biogás de vinhaça diretamente nas células a combustível. Estes combustíveis são mais baratos que as fontes tradicionais de hidrogênio, como a eletrólise e a reforma de gás natural, mas necessitam de um processo de purificação.

A macrotemática de geração de eletricidade via hidrogênio por meio de células a combustível está baseada no desenvolvimento de três principais rotas:

- Desenvolvimento de células a combustível do tipo PEM, SOFC, MCFC, PAFC, AFC, MCFC, dentre outras.
- Produção de hidrogênio: eletrólise, gaseificação, ciclos termoquímicos, ciclos fotoeletroquímicos, processos biológicos; e
- Armazenamento de hidrogênio: hidrogênio comprimido, armazenamento subterrâneo, hidrogênio líquido, sistemas de absorção física e química.

Considerando-se essas questões, foi apresentada nas Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18 a estrutura sobre a qual serão direcionadas as considerações feitas neste trabalho.

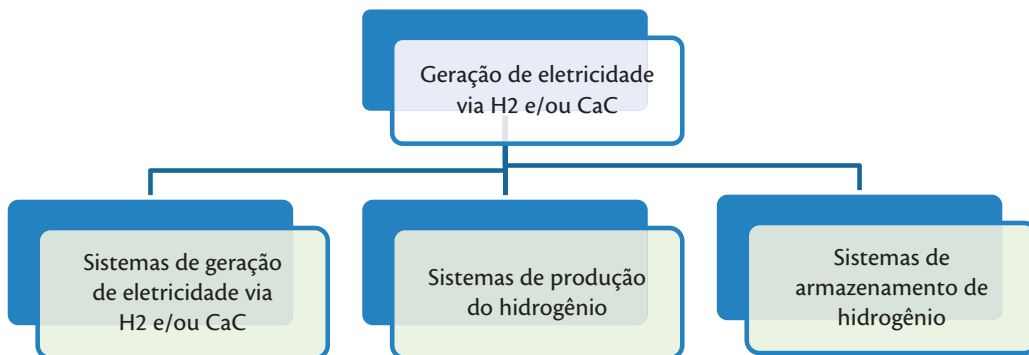


Figura 15 - Caracterização da macrotemática geração de eletricidade via h2 e/ou CaC, em nível de temáticas (Preenchimento na cor verde)

Fonte: Elaboração própria.

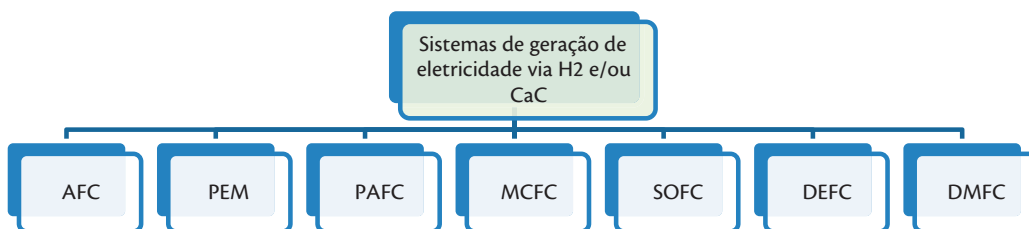


Figura 16 - Caracterização da macrotemática geração de eletricidade via h2 e/ou CaC, em nível de rotas tecnológicas (Preenchimento na cor verde; temática. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.

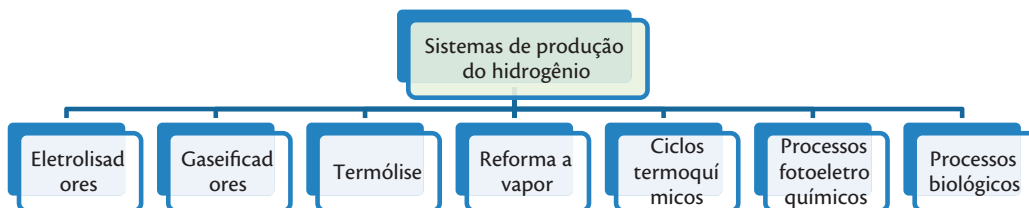


Figura 17 - Caracterização da macrotemática geração de eletricidade via h2 e/ou CaC, em nível de rotas tecnológicas (Preenchimento na cor verde; temática. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.



Figura 18 - Caracterização da macrotemática geração de eletricidade via H_2 e/ou CaC, em nível de rotas tecnológicas (Preenchimento na cor verde; temática. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.

8.1. Visão de futuro

8.1.1. Cenário setorial

Devido ao aumento populacional e da qualidade de vida, projeta-se um grande crescimento do consumo de energia no Brasil para as próximas décadas. Entretanto, há previsões de diminuição das reservas tradicionais de energia como as de petróleo e de gás natural. E a pressão ambiental por redução das emissões dos gases de efeito estufa resultou em uma busca por fontes renováveis de energia com baixa emissão desses gases.

Entretanto, o custo e o armazenamento de energia têm sido o grande desafio para o uso de qualquer tipo de energia renovável, assim como para o hidrogênio. O hidrogênio é o mais abundante gás do universo, mas sempre está misturado a outros elementos, como o oxigênio, na forma de água; ou como o carvão, na forma de metanol, etanol e petróleo, ou misturado com outros gases.

Para separá-lo de outros elementos é necessária energia elétrica (processo de eletrólise) ou térmica (processo de reforma, gaseificação).

O hidrogênio é largamente utilizado na indústria como matéria-prima de processos alimentício, siderúrgico, farmacêutico e químico.

Hoje, 95% da produção do hidrogênio vêm da reforma do gás natural e apenas uma parte vem da gaseificação. Atualmente, mais de 40 milhões de toneladas de hidrogênio são produzidas por ano no mundo. No Brasil, o mercado aproxima-se de um milhão de toneladas por ano.

Uma mistura de hidrogênio e monóxido de hidrogênio, denominada gás de síntese, é uma matéria-prima para formar combustíveis líquidos (querosene, diesel) e gasosos, polímeros como o polipropileno (PP) e o polietileno (PE) e insumos para a química fina. O gás de síntese pode ser obtido a partir da gaseificação do carvão, de biomassa e de resíduos agrícolas, de sólidos urbanos e industriais.

A gaseificação é uma potencial tecnologia para a produção de gás de síntese ou de hidrogênio de baixo custo. Segundo o *The Gasification and Syngas Technologies Council (GSTC)* existe um grande número de plantas de gaseificação no mundo, principalmente na Ásia. Para 2020, está planejada a geração de 370 MWth de gás de síntese, sendo 170 MWth para produtos químicos, 180 MWth para combustíveis líquidos e gasosos e 20 MWth como energia.

Para a geração de energia elétrica a partir do hidrogênio, pode-se utilizar as células a combustível, sistemas térmicos tradicionais (termoelétrica) ou outros processos inovadores (combustão cíclica).

As células a combustível possuem como vantagens a baixa emissão de poluentes, a alta eficiência e o baixo custo quando para uma produção seriada. Quando utilizado o hidrogênio puro, gera somente vapor d'água, energia e calor.

Segundo um recente artigo do *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy (IPHE)*, em novembro de 2016 existiam em operação no mundo 60 mil células a combustíveis, totalizando uma potência instalada de 300 MW. Em 2015, a comercialização cresceu 65% em relação a 2014.

Um dos grandes gargalos é o custo do hidrogênio para uma pequena escala de consumo, por exemplo, unidades geradoras de 5 kW e 50 kW a 1 MW.

Estabelecer metas para o Brasil para o desenvolvimento do setor é um grande desafio, pois existem enormes barreiras a serem vencidas, como as da tecnológica e a falta de uma cadeia de suprimentos e de mão de obra especializada. Um estudo realizado em 2010 pelo CGEE apontou diversos gargalos que hoje ainda persistem:

- Os equipamentos desenvolvidos no Brasil necessitam de ganhos de escala para se tornarem competitivos;



- Empresas brasileiras concorrem com competidores internacionais altamente incentivados em seus países de origem;
- Existe um volume insuficiente de normas e padrões nacionais relacionados à utilização energética do hidrogênio;
- As tecnologias do hidrogênio ainda possuem grande potencial de desenvolvimento tecnológico, redução de custos e ampliação de aplicações;
- Os institutos de pesquisa, as empresas e os pesquisadores vinculados ao desenvolvimento das tecnologias do hidrogênio não possuem um órgão representativo oficial de seus interesses.

Alguns países seguem as metas estabelecidas pelo departamento de energia dos Estados Unidos, tais como: para a célula a combustível ser competitiva em sistemas tradicionais automotivos, o custo de instalação deve ser menor que \$30/kW e para aplicações estacionárias, de \$400/kW a \$750/kW. A durabilidade para sistemas automotivos deve ser de cinco mil horas, o equivalente a 241 mil km e para estacionário, 40 mil horas. O custo de produção de hidrogênio é de 4 U\$D/gge e de armazenamento, de 10 U\$D/kwh.

No Brasil, foram incentivados a formação de recursos humanos (mestrados e doutorados) e o desenvolvimento de projetos de pesquisa fundamentais, vitais para a evolução tecnológica, formando laboratórios de grande prestígio internacional. Porém, pouco foi feito para a elaboração de produtos nacionais. Durante estes anos, um dos grandes problemas enfrentados foi a dificuldade de manter uma equipe e laboratórios capacitados. Deveria ser possível a realização de projetos de longo prazo, por exemplo, 10 anos, mantendo-se a mão de obra; e, ainda, que projetos de demonstração fossem exaustivamente testados e os resultados compartilhados com a indústria setorial brasileira.

8.1.2. Objetivo geral

O foco dos investimentos em PD&I está no desenvolvimento de tecnologias de implementação do hidrogênio na produção de energia elétrica (a partir de células a combustível) e no desenvolvimento de tecnologia nacional para a produção de hidrogênio renovável de baixo custo, por exemplo, a partir do biogás, para uso em células a combustível. Também é foco da PD&I o desenvolvimento de tecnologias que garantam elevada durabilidade (> 40.000 horas) dos sistemas de geração via hidrogênio em células a combustível.

8.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes, que incluem:

Curto Prazo (2017-2020)

- Desenvolvimento e/ou melhoramento de tecnologias para a geração de hidrogênio de baixo impacto ambiental e custo, como a reforma de etanol e gás natural, reator termoquímico solar, gaseificação, fotocatalise, eletrólise, geração de hidrogênio a partir de resíduos urbanos e industriais, combustão cíclica, dentre outros;
- Sistema de purificação de hidrogênio de baixo custo para uso de hidrogênio proveniente de reforma de gás natural e de biogás.

Médio Prazo (2020-2030)

- Sistema de armazenamento de hidrogênio (hidreto metálico, hidreto químico, nanotubo de carbono, forma química e outros);
- Sistema de distribuição de hidrogênio para baixas distâncias (sistema criogênico, cilindros de alta pressão, de compressão) e conversões para longas distâncias;
- Desenvolvimento ou aperfeiçoamento de células a combustível (célula a combustível a etanol direto - DEFC, célula a combustível a metanol direto - DMFC, SOFC e MCFC) que utilizem como fonte: etanol, metanol, gás natural e syngas;
- Desenvolvimento de componentes (placas bipolares, GDL, membranas, catalizadores) de menor custo para células a combustível do tipo Membrana de Troca Protônica (PEM);
- Desenvolvimento de novos catalisadores para a diminuição do custo de produção de hidrogênio e de células a combustível.

Longo Prazo (2030-2050)

- Desenvolvimento de tecnologias de produção do hidrogênio a partir de fontes renováveis;



- Desenvolvimento de sistema híbridos (combustão interna + célula a combustível + baterias) para a geração de eletricidade para atender à GD e aos demais sistemas de geração de eletricidade;
- Sistema de distribuição de hidrogênio para longas distâncias e volumes.

8.1.4. Fundamentação

A geração distribuída é uma tendência no Brasil e está se tornando realidade em centros urbanos, dadas as suas características funcionais: geração elétrica junto ou próxima do consumidor, independentemente da potência, da tecnologia e da fonte de energia. A GD tem evoluído para agregar sistemas de geração elétrica cada vez menores. Neste sentido, observa-se uma considerável vantagem no uso do hidrogênio para a geração de eletricidade via células a combustível.

Para esse processo de geração, é importante citar que a viabilidade econômica do uso do hidrogênio para a geração de eletricidade via célula a combustível ocorre em processos em que haja o aproveitamento de energia residual, por exemplo, em sistemas de cogeração. Sob esses aspectos, a GD oferece oportunidades para a produção mais barata do hidrogênio por meio do uso de fontes renováveis (como a eólica, a solar e as pequenas centrais hidroelétricas - PCHs), de combustíveis fósseis e de energia da biomassa.

Independentemente da utilização de energias residuais, justifica-se, também, a produção do hidrogênio para a geração de energia elétrica quando se considera o uso de células a combustível, o que pode ser uma solução apropriada, por exemplo, em centros urbanos com elevada concentração de partículas poluentes (geração de eletricidade e movimento).

Portanto, é plausível que haja fomento para o desenvolvimento de tecnologias nacionais de célula a combustível, com foco no aumento da eficiência na produção de eletricidade, e para o aprimoramento da geração do hidrogênio em sistemas como a DG e na cogeração, além de investimentos em P&D nas tecnologias de armazenamento e de transporte desse insumo.

8.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Conforme mencionado na metodologia, o cenário de futuro da macrotemática é configurado em resposta a um conjunto de métricas (ver Anexo) que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo.

No que diz respeito à evolução tecnológica, as métricas estão voltadas para a mitigação do custo das células a combustível, processos de geração de hidrogênio, eletrônica de potência e redução dos custos dos processos de armazenamento desse insumo.

Os respectivos custos estão diretamente ligados às tecnologias de fabricação e de componentes. Contudo, o uso do hidrogênio na produção de eletricidade via célula a combustível depende do comportamento do mercado e da abertura comercial que pode ser dada a essa tecnologia.

Atualmente, vários países adotaram suas políticas de incentivos fiscais para o desenvolvimento de tecnologias, visando ao desenvolvimento de materiais e de processos de fabricação mais eficientes. Contudo, observa-se que esta redução de custos tem ocorrido com maior fluência nos países economicamente melhor desenvolvidos, pois há um estímulo claro para a exportação e a produção. Isto configura mais um motivo para o desenvolvimento de produtos nacionais de elevada qualidade e competitivos, sob o ponto de vista do mercado internacional.

As métricas aplicadas neste contexto, portanto, caracterizam-se por serem aplicadas a todas as rotas.

As métricas voltadas para a estratégia setorial dizem respeito à aplicação de normas e aos incentivos ao desenvolvimento nacional das tecnologias das rotas e das tecnologias de manufatura. No contexto socioambiental, as métricas tiveram foco nas questões climáticas e na qualidade dos empregos gerados com o desenvolvimento da macrotemática no Brasil. Para os demais assuntos (produção de CT&I, estrutura de CT&I e indústria e mercado), não foram utilizadas métricas. Para estes, a macrotemática e as rotas tecnológicas foram caracterizadas conforme as orientações constantes na própria planilha de indicadores.



8.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste capítulo, são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associada aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas, e os fatores portadores de futuro que suportam essa evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

8.3.1. Temática geração de energia elétrica via células a combustível

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Célula a combustível do tipo alcalina (AFC)

Mitigar a sensibilidade da célula a combustível ao CO₂. Neste sentido, são investidos recursos para o desenvolvimento de sistemas de ultrapurificação do ar e do H₂, com foco na obtenção de gases ultrapuros sem reforma de combustível. Ver Gráfico 54.

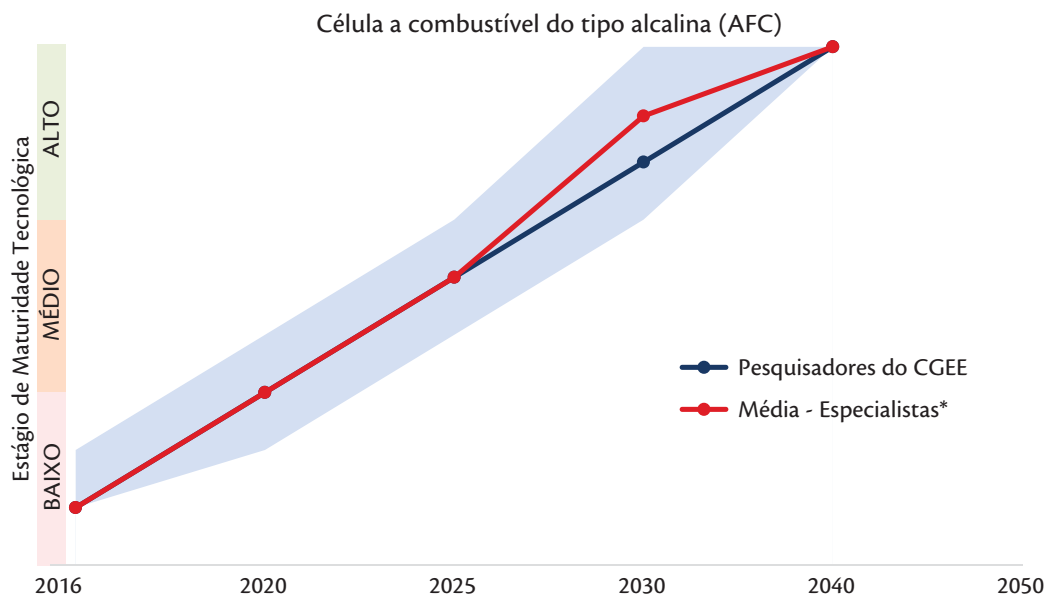


Gráfico 54 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível do tipo Alcalina (AFC)

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Célula a combustível do tipo membrana polimérica (PEM)

Nesse contexto, as pesquisas têm foco no uso de novos materiais (em particular, o eletrólito de membrana polimérica) capazes de suportar temperaturas entre 100 °C e 150 °C e de ser resistentes à corrosão, à oxidação e à decomposição dos eletrodos de carbono, das placas bipolares e dos polímeros usados como vedação. Outro ponto facilitador da abertura de mercado para essa tecnologia diz respeito ao seu uso na GD. Neste sentido, estima-se o desenvolvimento de tecnologias para a geração distribuída a partir de hidrogênio de origem renovável, permitindo o aproveitamento da energia renovável no local e no momento mais adequados, além de estudo. Ver Gráfico 55.

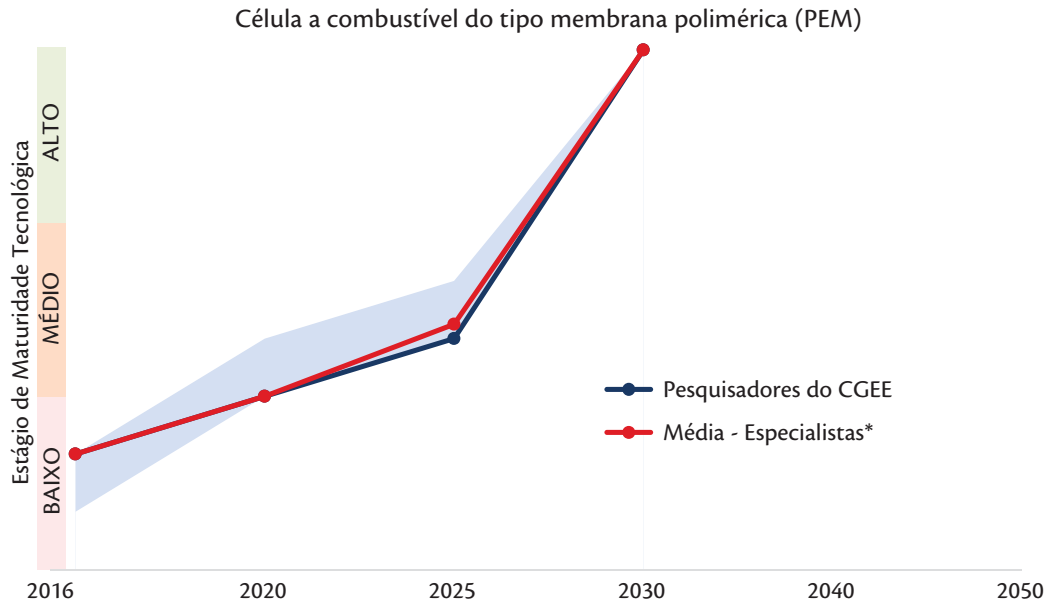


Gráfico 55 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível do tipo Membrana Polimérica (PEM)

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Célula a combustível do tipo ácido fosfórico (PAFC)

A pesquisa que fundamenta o roadmap dessa rota diz respeito ao desenvolvimento de tecnologias de purificação do hidrogênio para mitigar o CO, dada a sensibilidade do equipamento a essa espécie química, e de novos materiais resistentes à corrosão. Ver Gráfico 56.

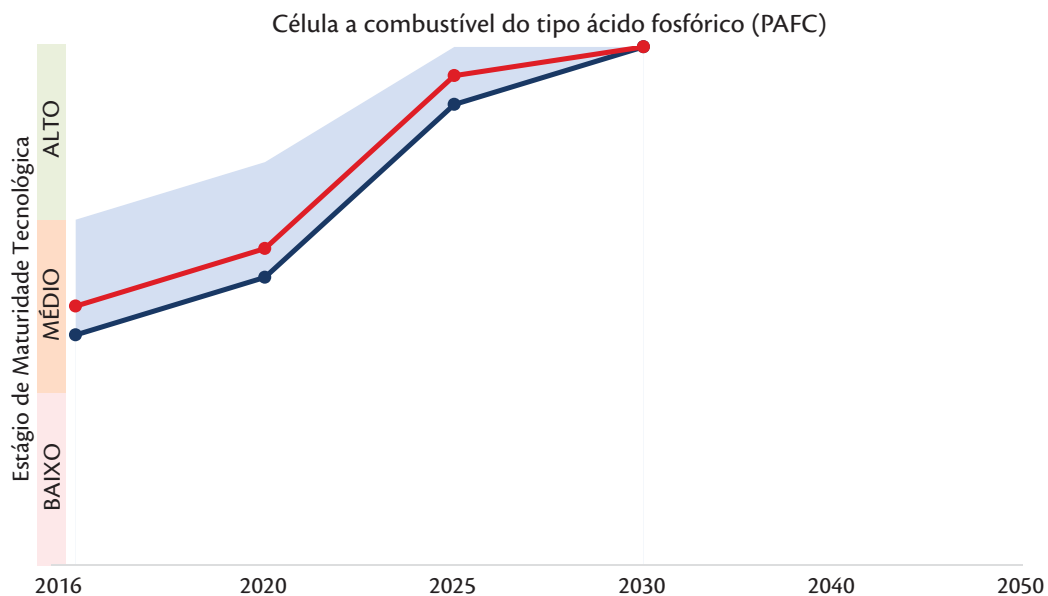


Gráfico 56 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível do tipo Ácido Fosfórico (PAFC)

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 32.



Tabela 32 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas AFC, PEM e PAFC

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Sistemas de geração de eletricidade via H ₂ /CaC	AFC	Fatores portadores de futuro	Fomento ao desenvolvimento da tecnologia, CT&I e cadeia produtiva	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração. Tecnologias em desenvolvimento com foco em mitigar a sensibilidade da célula a combustível ao CO ₂ . Tecnologias avançadas com foco na redução do custo dos periféricos	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos dos periféricos	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos dos periféricos	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		
	PEM	Fatores portadores de futuro	Fomento ao desenvolvimento da tecnologia, CT&I e cadeia produtiva	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração. Necessidade de se aumentar a tolerância ao CO e Sox e redução dos custos dos periféricos	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos dos periféricos		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		
	PAFC	Fatores portadores de futuro	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração. Desenvolvimento de tecnologias para a redução dos custos de fabricação. Tecnologias avançadas com foco na redução do custo dos periféricos	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos dos periféricos	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos dos periféricos		
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Célula a combustível do tipo óxido sólido (SOFC)

Nessa rota, o roadmap tem fundamento na redução da temperatura de operação para uma faixa intermediária (600 °C - 700 °C) ou até mais baixa (abaixo de 600 °C), de maneira a amenizar a maior parte dos problemas práticos na construção das Células (Pilhas) a Combustível (SOFC), devido a esta característica; desenvolvimento de materiais anódicos adequados ao uso direto de hidrocarbonetos, sem nenhum processamento químico prévio, que impeçam os problemas normalmente a isso associados, tais como a deposição de carbono sólido e a sensibilidade ao enxofre; melhoria das características de resistência mecânica, a estabilidade química das placas bipolares e o aumento da tolerância ao enxofre, atualmente moderada (50 ppm). Ver Gráfico 57.

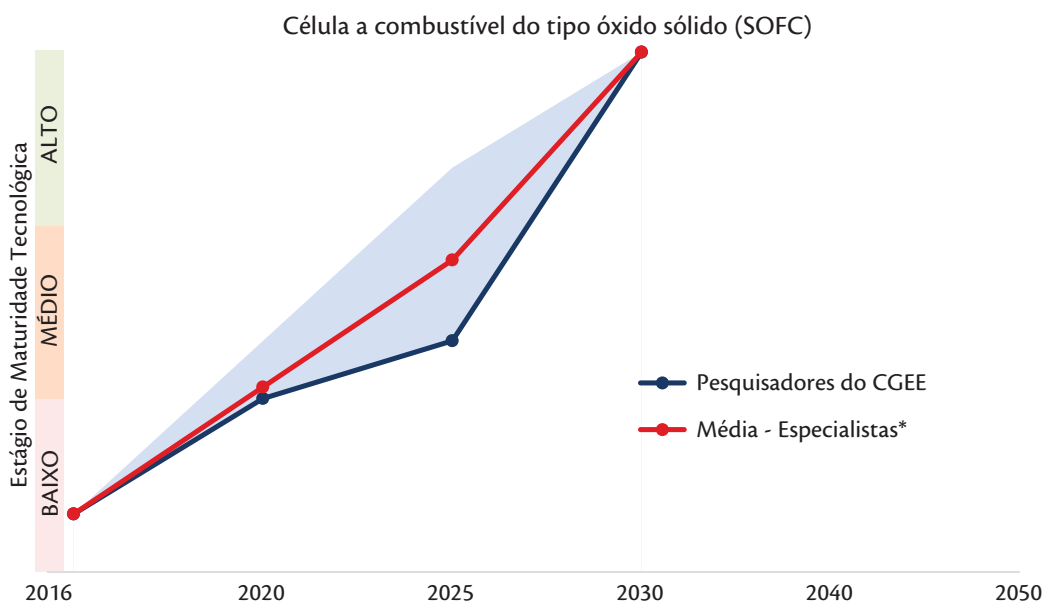


Gráfico 57 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível do tipo Óxido Sólido (SOFC)

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Célula a combustível a etanol direto (DEFC)

Aperfeiçoamento ou otimização do processo de síntese de catalisadores à base de paládio para a aplicação nessa tecnologia. Ver Gráfico 58.

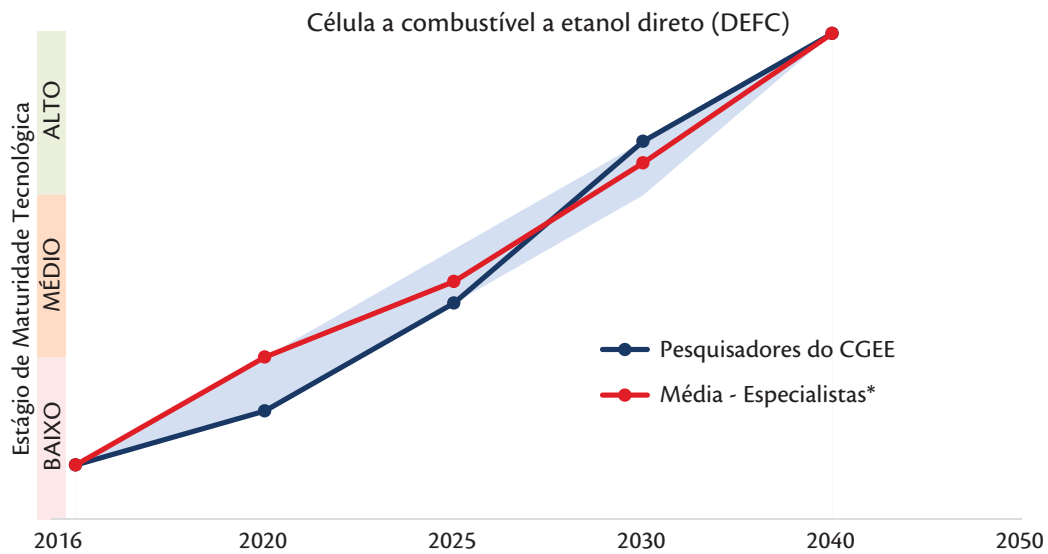


Gráfico 58 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível a Etano Direto (DEFC)

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Célula a combustível a metanol direto (DMFC)

O uso dessa tecnologia no mercado de energia exige o aumento da sua vida útil, o que pode ocorrer por meio da redução da permeabilidade da membrana ao metanol, pelo aumento da atividade do catalizador e pelo desenvolvimento de eletrólitos de custo menor. Ver Gráfico 59.

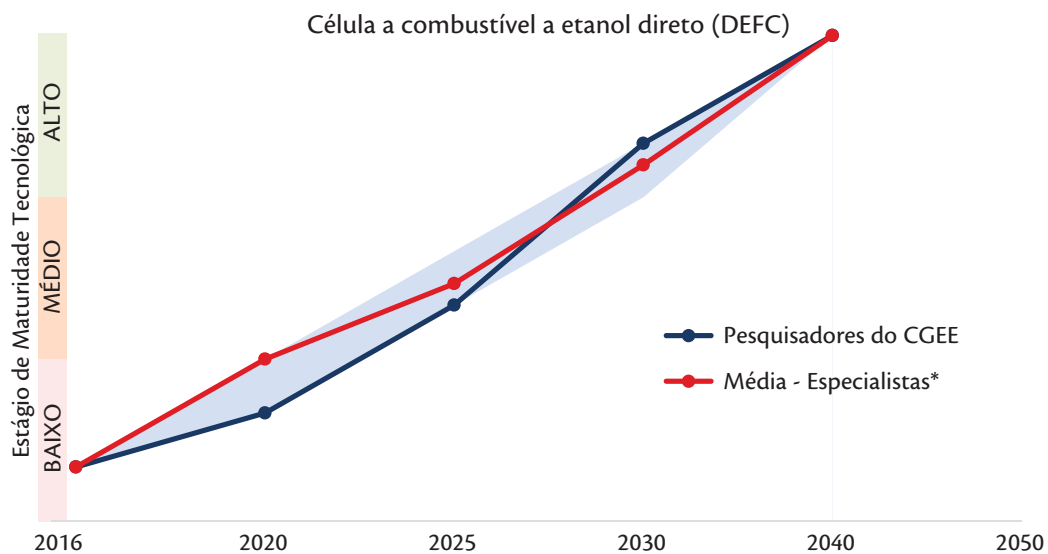


Gráfico 59 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível a Metanol Direto (DMFC)

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Célula a combustível de carbonato fundido (MCFC)

A evolução da maturidade dessa tecnologia está associada ao desenvolvimento de tratamentos superficiais apropriados contra a corrosão de partes metálicas do empilhamento. Ver Gráfico 60.

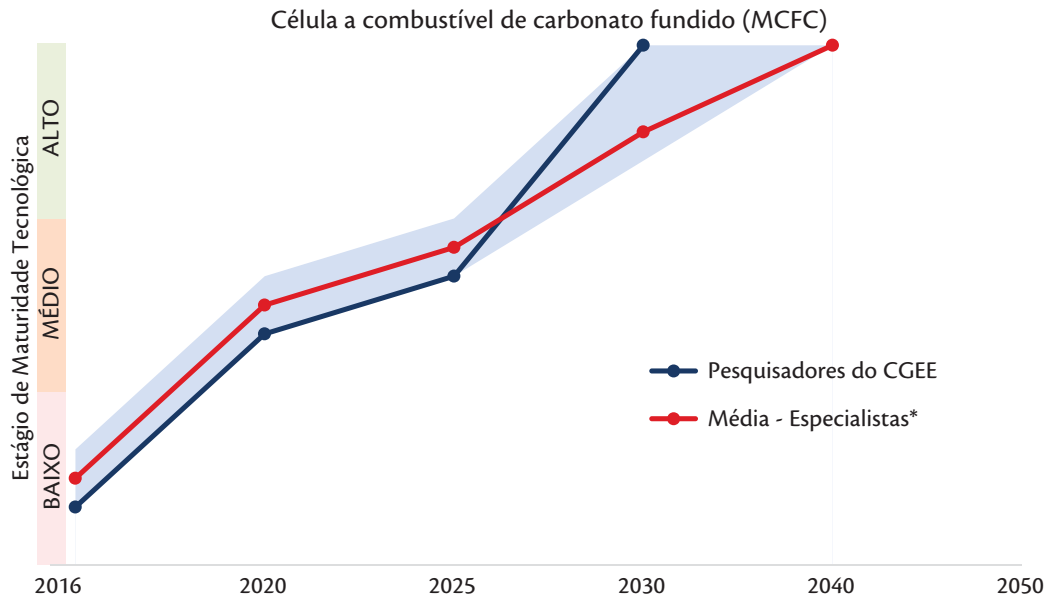


Gráfico 60 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível de Carbonato Fundido (MCFC)

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas SOFC, DEFC, DMFC e MCFC

Temática	Rota	Dado	Período						
			2016	2020	2025	2030	2040	2050	
Temática - Sistemas de geração de eletricidade via H ₂ /CaC	SOFC	Fatores portadores de futuro	Fomento ao desenvolvimento da tecnologia, CT&I e cadeia produtiva	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração. Tecnologias avançadas com foco na redução do custo dos periféricos	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos da tecnologia e periféricos			
		Maturidade	BAIXO		MEDIO	ALTO			
	DEFC	Fatores portadores de futuro	Fomento ao desenvolvimento da tecnologia, CT&I e cadeia produtiva	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração e estudos avançados com foco no desenvolvimento de catalisadores e membranas especiais.	Estudos avançados com foco no desenvolvimento de catalisadores e membranas especiais. Tecnologias avançadas com foco na redução do custo dos periféricos	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos da tecnologia e periféricos		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO			
	DMFC	Fatores portadores de futuro	Fomento ao desenvolvimento da tecnologia, CT&I e cadeia produtiva	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração	Estudo avançado para mitigar a toxicidade do metanol. Tecnologias avançadas com foco na redução do custo dos periféricos	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos da tecnologia e periféricos		
		Maturidade	BAIXO		MEDIO		ALTO		
	MCFC	Fatores portadores de futuro	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração	Desenvolvimento da GD e sistemas de cogeração. Processo avançado de maturação do conhecimento sobre essa tecnologia no BR	Processo avançado de maturação do conhecimento sobre essa tecnologia no BR. Tecnologias avançadas com foco na redução do custo dos periféricos	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos da tecnologia e periféricos			
		Maturidade	BAIXO	MEDIO		ALTO			

Fonte: Elaboração própria.



8.3.2. Temática produção do hidrogênio

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Eletrolisador alcalino

Para essa rota, foi levado em conta o desenvolvimento de tecnologias com foco no aumento da eficiência do sistema, na redução dos custos de instalação e O&M, na melhoria da flexibilidade operacional, no aumento da pressão de operação e no desenvolvimento de sistemas integrados com geradores elétricos de fontes renováveis. Ver Gráfico 61.

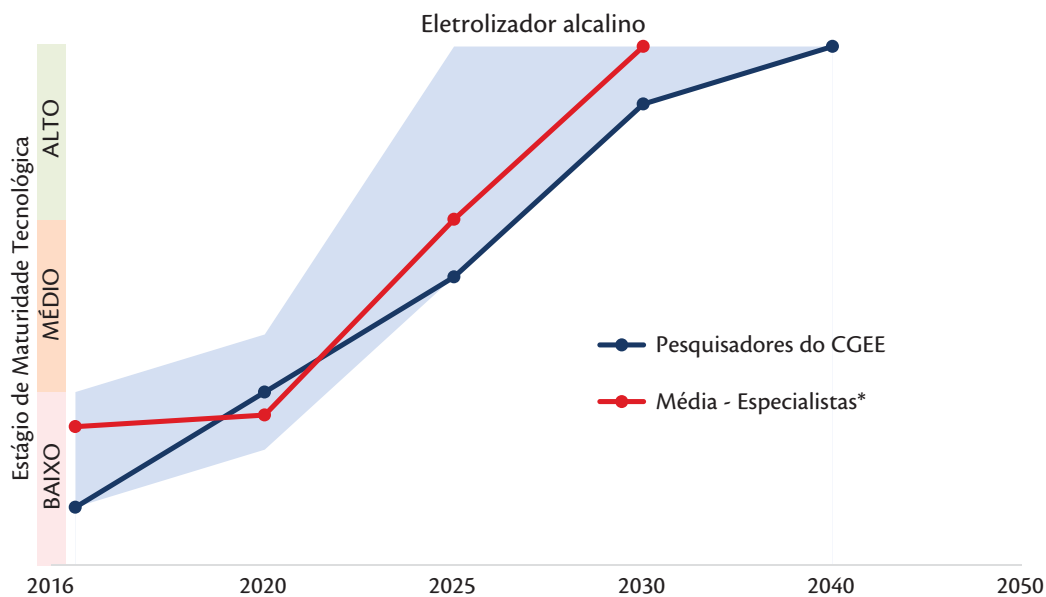


Gráfico 61 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Eletrolisador Alcalino

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Eletrolisadores de membranas poliméricas

Desenvolvimento de novos materiais para a membrana polimérica caracterizados por menor custo, maior condutibilidade iônica, maior durabilidade e maior resistência mecânica (o que permitiria o aumento da pressão de operação). Pesquisa com foco na redução da quantidade de metais nobres (Pt e Ir) empregada nos catalisadores e sobre eletrocatalisadores alternativos que não contenham esses elementos de alto custo. Ver Gráfico 62.

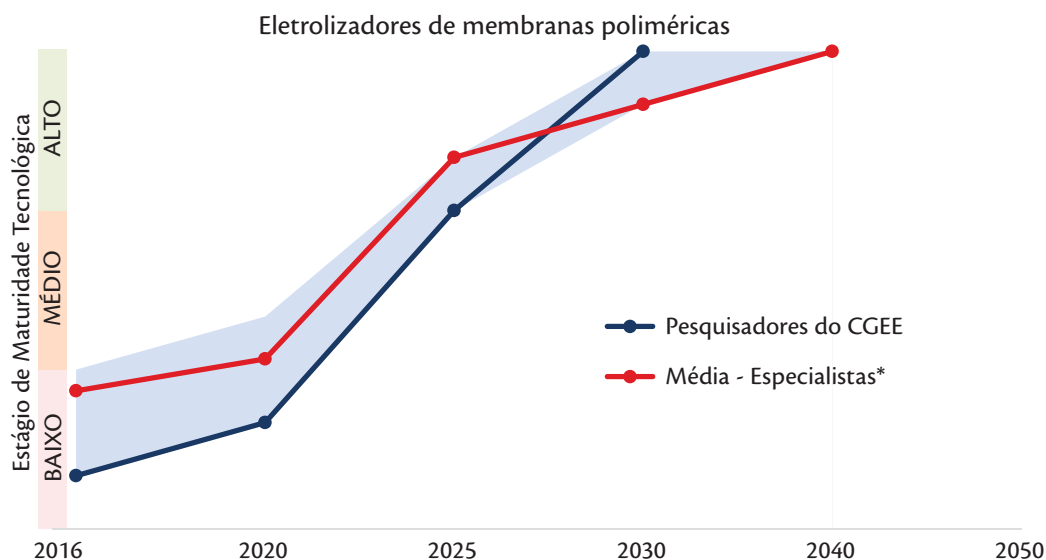


Gráfico 62 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Eletrolisadores de Membranas Poliméricas

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Eletrolisadores de óxidos sólidos

Desenvolvimento de sistemas integrados de eletrolisadores e de geradores elétricos de fontes renováveis, otimizados para maximizar a produção de hidrogênio e minimizar o custo de produção, aproveitando recurso específico. Ver Gráfico 63.

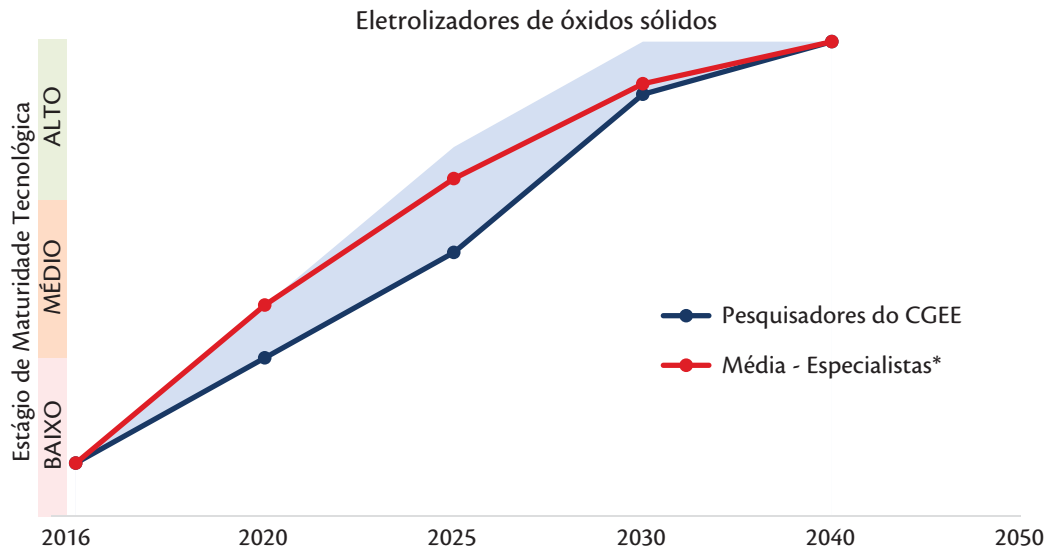


Gráfico 63 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Eletrolizadores de Óxidos Sólidos

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Eletrolisador Alcalino, Eletrolisadores de Membranas Poliméricas e Eletrolisadores de Óxidos Sólidos

Temática	Rota	Dado	Período						
			2016	2020	2025	2030	2040	2050	
Temática - Produção de hidrogénio	Eletrolisador alcalino	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e à cadeia produtiva,	Estudos com foco na nacionalização da tecnologia	Protótipo nacional em fase de testes	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.			
		Maturidade		BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Eletrolisadores de membranas poliméricas	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e à cadeia produtiva,	Estudos com foco na nacionalização da tecnologia. Desenvolvimento da GD e repotenciação da cadeia produtiva	Protótipo nacional em fase de testes	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.			
		Maturidade		BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Eletrolisadores de óxidos sólidos	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e à cadeia produtiva,	Desenvolvimento de materiais com foco na elevada temperatura de operação da tecnologia. Desenvolvimento da GD e repotenciação da cadeia produtiva	Protótipo com novos materiais em fase de teste.	Protótipo em operação real para estudos finais.	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.		
		Maturidade		BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.



Rota - Gaseificação e reforma a vapor

Pesquisa com foco na elevação da vida útil dos catalisadores, dos atuais 2-4 anos para 6-8 anos. Pesquisa para a adaptação da tecnologia de reforma a vapor a sistemas de escalas média e pequena que possam ser instalados de forma difundida em vez de centralizada. Ver Gráfico 64.

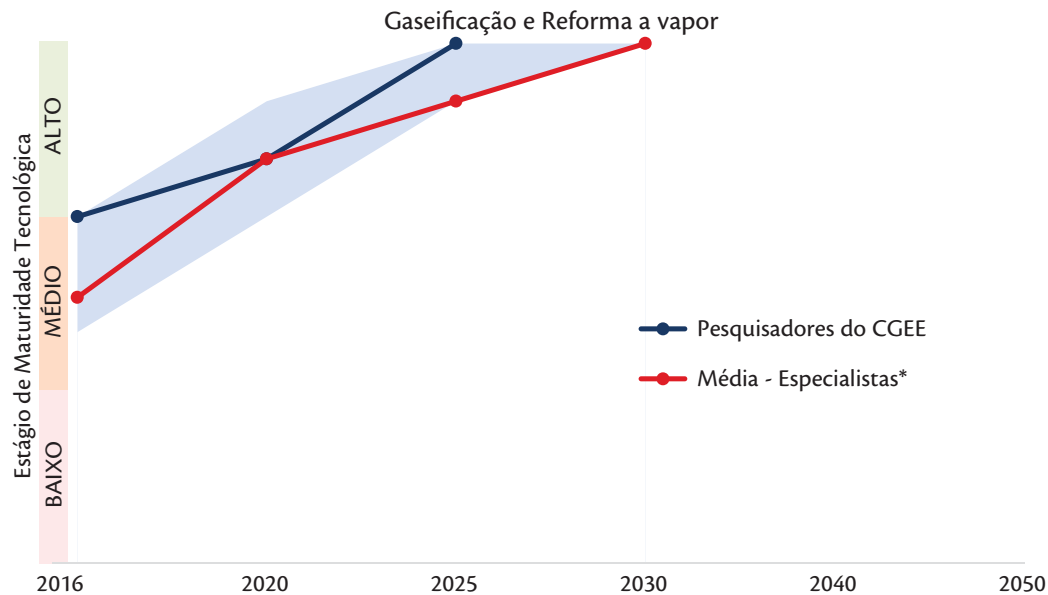


Gráfico 64 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Gaseificação e Reforma a Vapor

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Ciclos termoquímico

Desenvolvimento de materiais de baixo custo capazes de trabalhar com vida útil longa nas condições agressivas requeridas pelos ciclos termoquímicos, como a elevada temperatura (500 °C - 2000 °C) e o ambiente corrosivo ou altamente reativo. Desenvolvimento de processos robustos, seguros, de elevada eficiência e boa resposta dinâmica, minimizando as perdas de calor e de H₂ gerados, além de equipamentos auxiliares (como o sistema de purificação da água usada como insumo e o de separação do H₂ gerado) econômicos, eficientes e duráveis, que garantam a redução dos custos de instalação e de operação dos sistemas. Ver Gráfico 65.

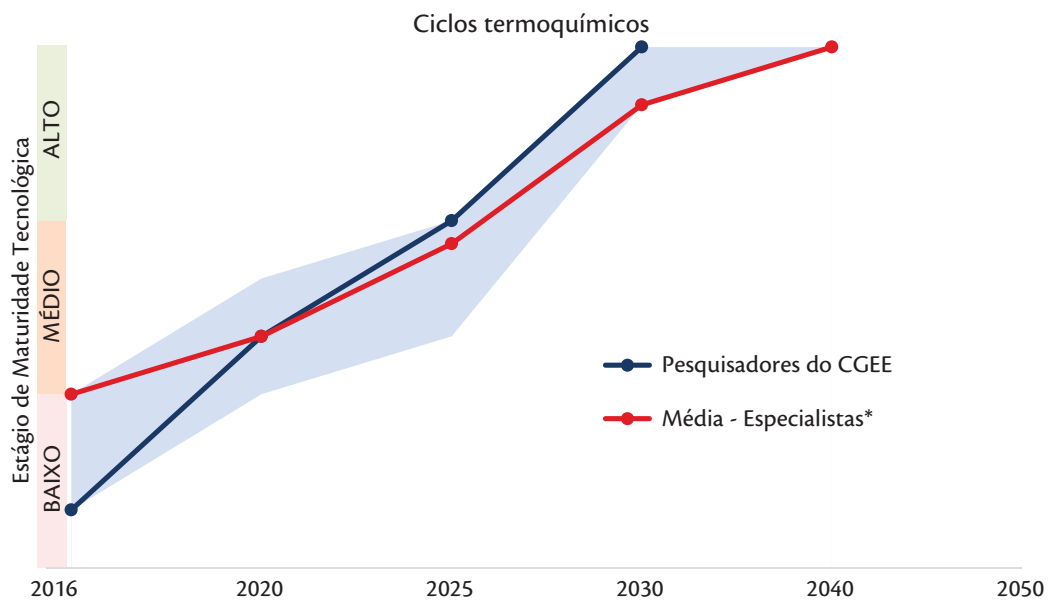


Gráfico 65 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Ciclos Termoquímicos

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Processos biológicos

Desenvolvimento de reatores bioquímicos otimizados (produção fotolítica a partir de água, produção fotossintética bacteriana a partir de matéria orgânica, produção fermentativa no escuro, a partir de matéria orgânica, sistemas integrados de produção biológica), em que os três métodos citados são aplicados em combinação. Ver Gráfico 66.

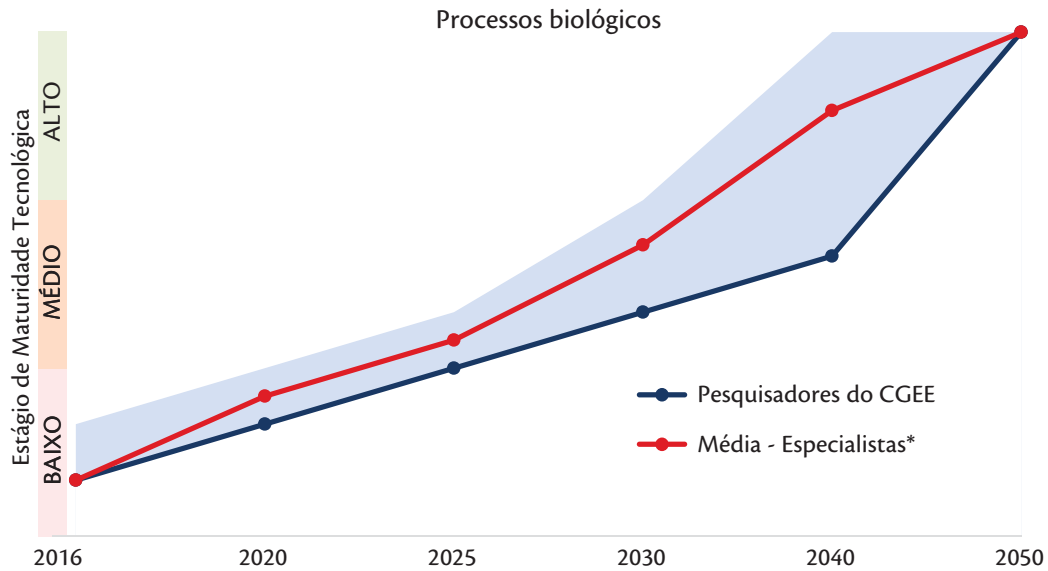


Gráfico 66 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Processos Biológicos

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Processos fotoeletroquímicos

Desenvolvimento de materiais inovadores que possam satisfazer os requisitos de eficiência, durabilidade e custo necessários à viabilização do emprego dessa tecnologia. Ver Gráfico 67.

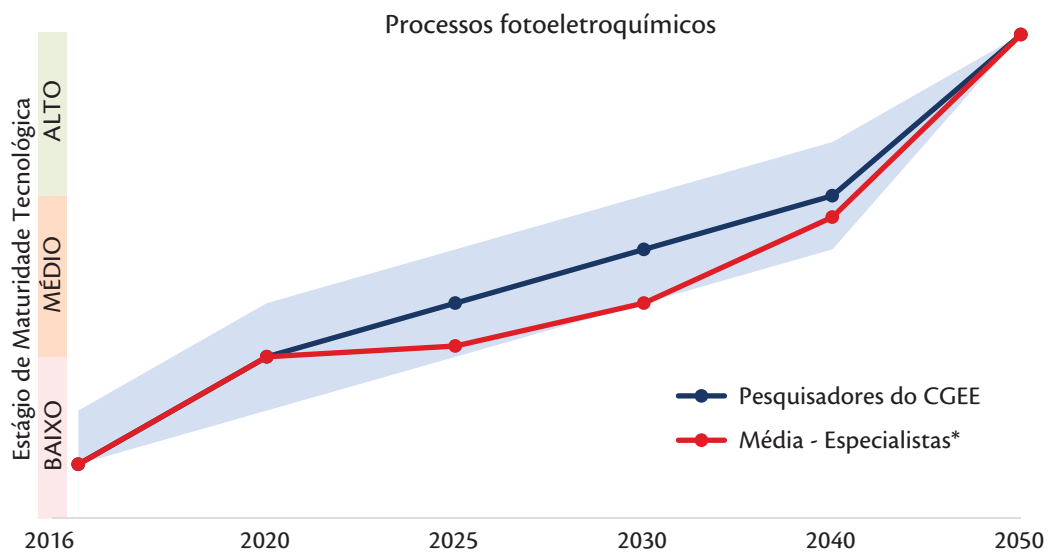


Gráfico 67 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Processos Fotoeletroquímicos

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 35.



Tabela 35 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Gaseificação e Reforma a Vapor, Ciclos Termoquímicos, Processos Biológicos e Processos Fotoeletroquímicos

Temática	Rota	Dado	Período						
			2016	2020	2025	2030	2040	2050	
Temática - Produção de hidrogênio	Gaseificação e reforma a vapor	Fatores portadores de futuro	Processo de gaseificação da biomassa - bagaço de cana - em desenvolvimento.	Processo de gaseificação da biomassa - bagaço de cana - em testes preliminares. Desenvolvimento da GD e repotenciação da cadeia produtiva	Metodologia de implantação e monitoramento dos testes com a tecnologia em condições reais de operação	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.			
		Maturidade	MÉDIO			ALTO			
	Ciclos termoquímicos	Fatores portadores de futuro	Desenvolvimento de materiais com foco na elevada temperatura de operação da tecnologia.	Desenvolvimento de equipamentos auxiliares (como o sistema de purificação da água usada como insumo e o sistema de separação do H2 gerado) econômicos, eficientes e duráveis que garantam a redução dos custos de instalação e operação dos sistemas. Desenvolvimento da GD e repotenciação da cadeia produtiva	Protótipo com novos materiais em fase de teste.	Protótipo em operação real para estudos finais.	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO			ALTO		
	Processos biológicos	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e à cadeia produtiva,	Pesquisa avançada com foco no desenvolvimento de reatores bioquímicos. Desenvolvimento da GD e repotenciação da cadeia produtiva	Desenvolvimento de protótipo de reatores bioquímicos para pesquisas laboratoriais	Implementação das melhorias tecnológicas	Caracterização de reatores bioquímicos com foco na produção fotolítica a partir de água, produção fotossintética bacteriana a partir de matéria orgânica, produção fermentativa no escuro, a partir de matéria orgânica, sistemas integrados de produção biológica, onde os três métodos acima são aplicados em combinação	Protótipo em operação real para estudos finais.	
		Maturidade		BAIXO			MÉDIO		ALTO
	Processos fotoeletroquímicos	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e à cadeia produtiva,	Pesquisa avançada com foco no desenvolvimento de processos fotoeletroquímico. Desenvolvimento de protótipo de reatores bioquímicos para pesquisas. Desenvolvimento da GD e repotenciação da cadeia produtiva	Desenvolvimento de protótipo de reatores bioquímicos para pesquisas laboratoriais	Implementação das melhorias tecnológicas	Desenvolvimento de protótipo de reatores bioquímicos para aplicação em operação real para estudos	Consolidação de resultados e implementação de melhorias.	
		Maturidade		BAIXO			MÉDIO		ALTO

Fonte: Elaboração própria.

8.3.3. Temática tecnologias de armazenamento

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Hidrogênio comprimido

Desenvolvimento de materiais e técnicas de fabricação empregados, que precisam garantir o respeito dos vínculos de peso, tamanho, custo e desempenho, fornecendo elevada resistência à corrosão e à permeação de H₂. Ver Gráfico 68.

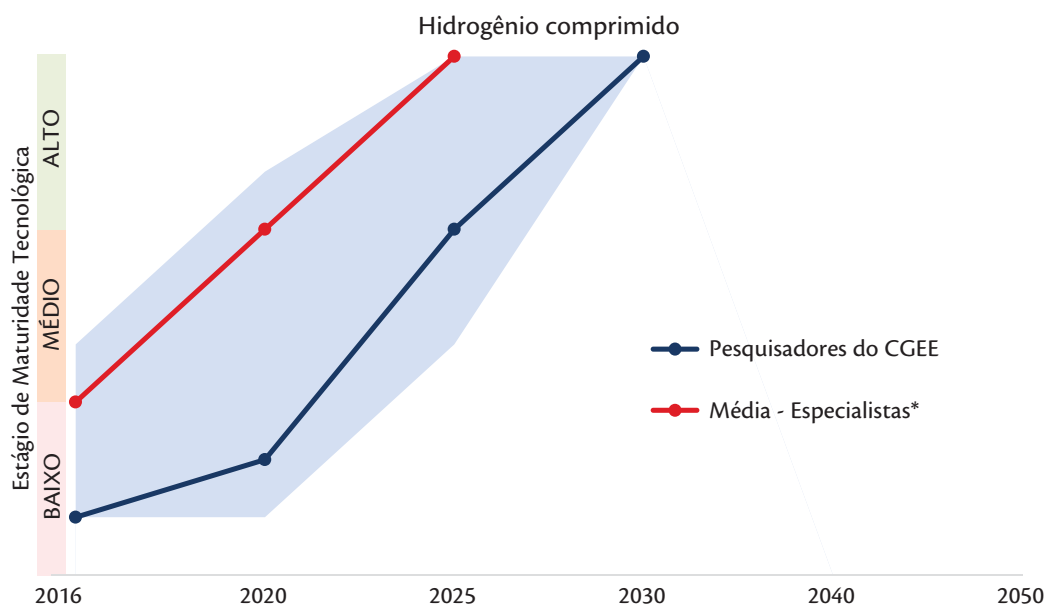


Gráfico 68 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Hidrogênio Comprimido

Fonte: Elaboração própria.



Rota - Armazenamento em compostos químicos

Desenvolvimento de modelos de sistema de armazenamento experimentais via compostos químicos para estudos. Ver Gráfico 69.

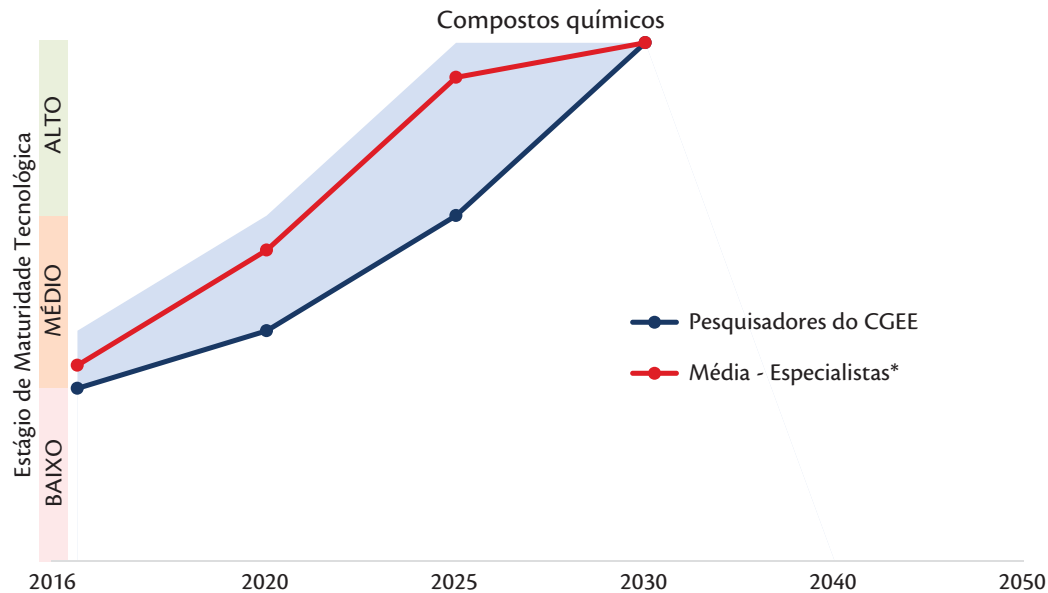


Gráfico 69 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compostos Químicos

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Armazenamento subterrâneo

Para essa rota, o roadmap tem fundamento no mapeamento geológico dos locais adequados ao armazenamento subterrâneo do H₂ e desenvolvimento de tecnologias para o transporte do hidrogênio ao ponto de armazenamento. Ver Gráfico 70.

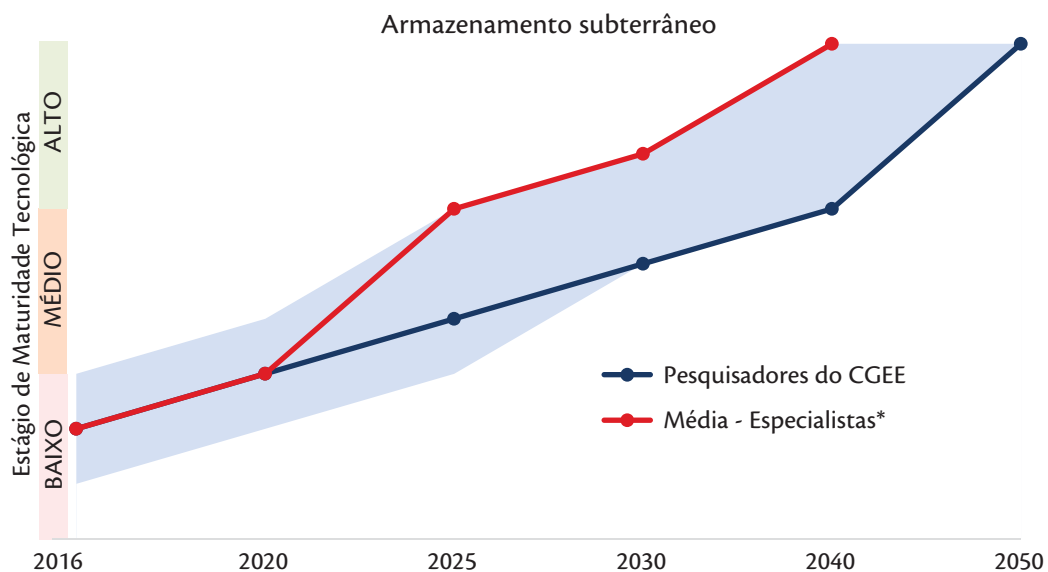


Gráfico 70 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Armazenamento Subterrâneo

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 36.



Tabela 36 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Hidrogênio Comprimido, Compostos Químicos e Armazenamento Subterrâneo

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Tecnologias de armazenamento	Hidrogênio comprimido	Fatores portadores de futuro	Estudos avançados com foco em novos materiais poliméricos	Estudos avançados com foco em novos materiais poliméricos	GD desenvolvida. Desenvolvimento de protótipo para testes	Implantação dos sistemas e armazenamento para operação e estudos.	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota.	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		
	Armazenamento em compostos químicos	Fatores portadores de futuro	Desenvolvimento de protótipo para testes	Desenvolvimento de protótipo para testes	GD desenvolvida. Implantação dos sistemas e armazenamento para operação e estudos.	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.	Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota	
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			
	Armazenamento subterrâneo	Fatores portadores de futuro	Fomentos à CT&I e à cadeia produtiva, estudos avançados sobre tecnologias do setor de petróleo com foco no aprimoramento de tecnologias de armazenamento subterrâneo e mapeamento geológico dos locais considerados adequados	Estudos avançados sobre tecnologias do setor de petróleo com foco no aprimoramento de tecnologias de armazenamento subterrâneo e mapeamento geológico dos locais considerados adequados	Protótipos em escala laboratorial para estudos avançados	Protótipos em escala laboratorial para estudos avançados	Protótipos em escala laboratorial para estudos avançados	Protótipos em escala operacional para estudos avançados. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Hidrogênio líquido

A evolução da maturidade desta rota fundamenta-se no desenvolvimento de tecnologias para mitigar o elevado gasto energético do processo de liquefação, que pode chegar ao 30% do poder calorífico do gás liquefeito, representando aproximadamente a metade do custo do armazenamento e do transporte. Consideram-se, também, novas tecnologias com foco em mitigar as emissões de hidrogênio gasoso devido ao *boil off* do líquido armazenado, que reduzem a eficiência e aumentam o custo do processo, representando ao mesmo tempo um potencial problema de segurança. Ver Gráfico 71.

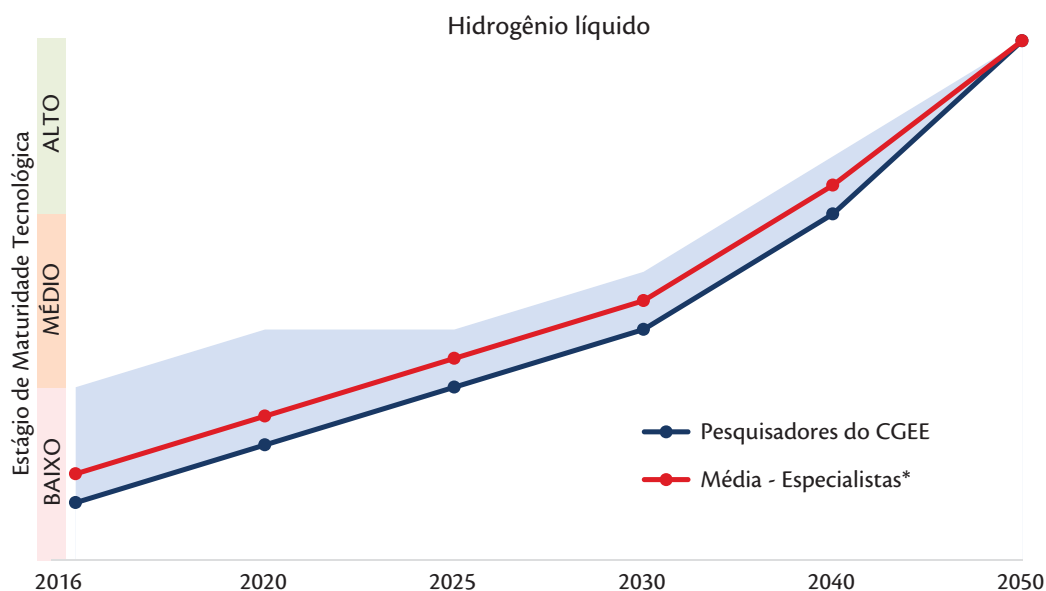


Gráfico 71 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Hidrogênio Líquido

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Sistemas de absorção física

Desenvolvimento de novos materiais que absorvam fisicamente o hidrogênio para o armazenamento em pressão e temperatura ambientes, capazes de alcançar nessas condições valores adequados de densidade gravimétrica e volumétrica. Ver Gráfico 72.

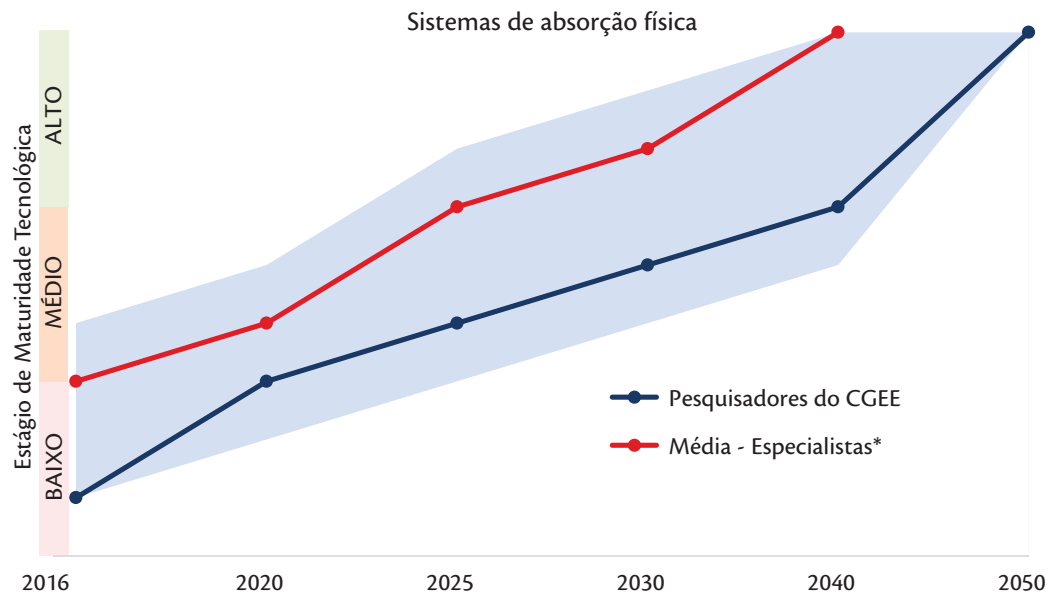


Gráfico 72 - Evolução da maturidade tecnológica da rota sistemas de absorção física

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Sistemas de absorção química

Estudo com foco na identificação de materiais adequados com elevada densidade de armazenamento gravimétrica e volumétrica, com completa reversibilidade em condições ambiente (ou pelo menos em temperaturas moderadas, ao máximo 80 °C - 100 °C), taxas de absorção/dessorção elevadas e baixo custo. Ver Gráfico 73.

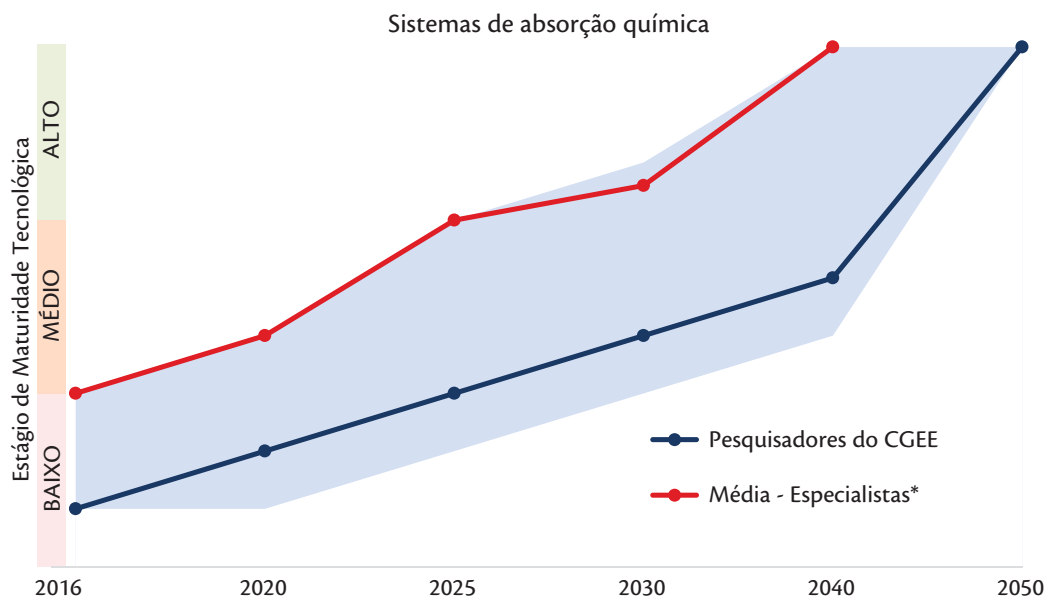


Gráfico 73 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas de Absorção Química

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 37.



Tabela 37 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Hidrogênio Líquido, Sistemas de Absorção Física e Sistemas de Absorção Química

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Tecnologias de armazenamento	Hidrogênio líquido	Fatores portadores de futuro	Fomentos à CT&I e à cadeia produtiva, estudos avançados para mitigar o elevado gasto energético do processo de liquefação	Estudos avançados para mitigar o elevado gasto energético do processo de liquefação e elevar a eficiência energética do processo de compressão do gás. Estudos avançados com foco na eficiência do sistema de armazenamento do hidrogênio líquido (resistência menos porosidade)	GD desenvolvida. Protótipos de equipamentos e processos de armazenamento caracterizados para testes em laboratório	Sistemas de O&M estudados e definidos	Protótipos de equipamentos e processos de armazenamento caracterizados para testes em escala operacional	Protótipos de equipamentos e processos de armazenamento caracterizados para testes em escala operacional. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade		BAIXO		MÉDIO		ALTO
	Sistemas de absorção física	Fatores portadores de futuro	Fomentos à CT&I e à cadeia produtiva, estudos avançados para o desenvolvimento de novos materiais que absorvam fisicamente o hidrogênio para o armazenamento em pressão e temperatura ambientes	Fomentos à CT&I e à cadeia produtiva, estudos avançados para o desenvolvimento de novos materiais que absorvam fisicamente o hidrogênio para o armazenamento em pressão e temperatura ambientes	GD desenvolvida. Protótipos de equipamentos e processos de armazenamento caracterizados para testes em laboratório	Sistemas de O&M estudados e definidos	Protótipos de equipamentos e processos de armazenamento caracterizados para testes em escala operacional. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.	
		Maturidade		BAIXO		MÉDIO		ALTO
	Sistemas de absorção química	Fatores portadores de futuro	Fomentos à CT&I e à cadeia produtiva, estudos avançados para o desenvolvimento de materiais adequados com elevada densidade de armazenamento	Fomentos à CT&I e à cadeia produtiva, estudos avançados para o desenvolvimento de materiais adequados com elevada densidade de armazenamento	GD desenvolvida. Protótipos de equipamentos e processos de armazenamento caracterizados para testes em laboratório	Sistemas de O&M estudados e definidos	Protótipos de equipamentos e processos de armazenamento caracterizados para testes em escala operacional. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.	
		Maturidade		BAIXO		MÉDIO		ALTO

Fonte: Elaboração própria.

8.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro.

Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas conforme apresentado na Tabela 38.

Tabela 38 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Célula combustível do tipo óxido sólido (SOFC)	Sistemas de geração de eletricidade via H2 e/ou CaC
2	Célula a combustível do tipo membrana polimérica (PEM)	Sistemas de geração de eletricidade via H2 e/ou CaC
3	Hidrogênio comprimido	Sistemas de armazenamento de hidrogênio
4	Eletrolisadores de óxidos sólidos	Sistemas de produção do hidrogênio
5	Gaseificação e reforma a vapor	Sistemas de produção do hidrogênio
6	Eletrolisadores de membranas poliméricas	Sistemas de produção do hidrogênio
7	Eletrolisador alcalino	Sistemas de armazenamento de hidrogênio
8	Sistemas de absorção química	Sistemas de produção do hidrogênio
9	Processos biológicos	Sistemas de produção do hidrogênio
10	Célula a combustível do tipo alcalina (AFC)	Sistemas de geração de eletricidade via H2 e/ou CaC
11	Sistemas de absorção física	Sistemas de armazenamento de hidrogênio



Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
12	Célula a combustível a etanol direto (DEFC)	Sistemas de geração de eletricidade via H ₂ e/ou CaC
13	Compostos químicos	Sistemas de armazenamento de hidrogênio
14	Armazenamento subterrâneo	Sistemas de armazenamento de hidrogênio
15	Célula combustível do tipo carbonetos fundidos (MCFC)	Sistemas de geração de eletricidade via H ₂ e/ou CaC
16	Célula a combustível do tipo ácido fosfórico (PAFC)	Sistemas de geração de eletricidade via H ₂ e/ou CaC
17	Ciclos termoquímicos	Sistemas de produção do hidrogênio
18	Processos fotoeletroquímicos	Sistemas de produção do hidrogênio
19	Hidrogênio líquido	Sistemas de armazenamento de hidrogênio
20	Célula a combustível a metanol direto (DMFC)	Sistemas de geração de eletricidade via H ₂ e/ou CaC

Fonte: Elaboração própria.

O Brasil possui algumas vantagens sobre os demais países, a exemplo da vasta área agrícola e dos recursos naturais. A cana-de-açúcar é fonte de hidrogênio tanto pela reforma do álcool quanto pela gaseificação do bagaço ou de outras biomassas. Para cada litro de álcool, produz-se 11 litros de vinhaça e pela biodecomposição desse material é possível obter metano. Pela reforma do método tem-se o hidrogênio. Os resíduos sólidos urbanos também são uma importante fonte de metano.

O Brasil possui gás natural encanado em toda cidade e nos postos de combustível (álcool). Considerando-se esta questão, seria possível gaseificar o etanol, que pode ser usado diretamente em células do tipo DEFC; ou recorrer à logística do gás nos centros urbanos e utilizar o gás natural diretamente nas células do tipo SOFC ou MCFC.

Outro importante ponto diz respeito à utilização da energia elétrica excedente nos sistemas GD para a produção de hidrogênio via tecnologias de eletrolisação.

O ciclo da geração de eletricidade via hidrogênio/célula a combustível passa pelos sistemas de armazenamento. Neste contexto, o sistema de armazenamento via compressão do hidrogênio

apresenta-se mais viável, do ponto de vista econômico e de aplicação, desde que sejam mitigadas questões como a corrosão e a perda do hidrogênio pela permeação de H₂.

À vista deste cenário, é justificável a priorização das rotas tecnológicas apresentadas na Tabela 38.



Capítulo 9



Capítulo 9

Macrotemática Geração Hidroelétrica

A vocação nacional para a geração de energia elétrica é hidráulica. Embora haja esforços no sentido de introduzir novas fontes na matriz energética de geração de eletricidade, a geração nos horários de ponta de carga continuará sendo proveniente dos sistemas que operam via energia potencial gravitacional, principalmente, e, em menor parte, via energia cinética das correntes.

Essa é uma característica desejável a qualquer país, sob o ponto de vista de segurança energética e da renovação dos recursos energéticos. A maioria das usinas de geração hidroelétrica implantadas no Brasil, basicamente, opera com sistemas de armazenamento de água, com elevada capacidade de geração. As chamadas PCHs também fazem parte desse sistema e incluem plantas que operam com e sem reservatório. Outra importante rota de geração hidroelétrica que vem sendo introduzida na matriz elétrica nacional é a geração via corrente ou curso d'água, em que turbinas do tipo hidrocinéticas são aplicadas no processo de recuperação de energia da fonte.

As rotas de geração de energia hidroelétrica via rodas d'água e carneiro mecânico não são expressivas no contexto nacional e, por isso, caracterizam-se como rotas menos atrativas. Outro importante ponto a ser citado é a questão da O&M, dada a sua importância na perpetuidade técnica dos sistemas de geração hidroelétrica e também na segurança, confiabilidade operacional e redução de custos.

Como derivação das respectivas rotas, também cabe ao contexto Brasil priorizar as tecnologias baseadas na configuração de sistema combinado de energia potencial gravitacional com armazenamento e sistemas hidrocinéticos, à jusante. É importante observar o uso de usinas com turbinas de bulbo, já que boa parte das usinas hidrelétricas no Norte e no Nordeste do Brasil é de baixa queda e grandes vazões.

O uso de usinas de ciclo reversível também é uma rota a ser pensada. É desejável que esse tipo de sistema trabalhe de forma harmônica com outras fontes de energia como a solar, a eólica e as térmicas. O desafio deste tipo de usina consiste em determinar se a energia consumida para bombear a água será inferior à energia gerada para a usina para determinar a sua viabilidade energética. A energia

usada para bombear a água pode vir de fontes externas ou mesmo da energia gerada pela própria usina. Esta linha representa um tema de pesquisa importante no Brasil.

O desenvolvimento tecnológico dessas rotas garantirá não só a perpetuidade da fonte hidroelétrica, como também servirá de subsídio para a garantia do atendimento da demanda de eletricidade de ponta.

Assim, foi considerada a estrutura apresentada na Figura 19 sobre a qual serão direcionadas as considerações feitas neste trabalho.

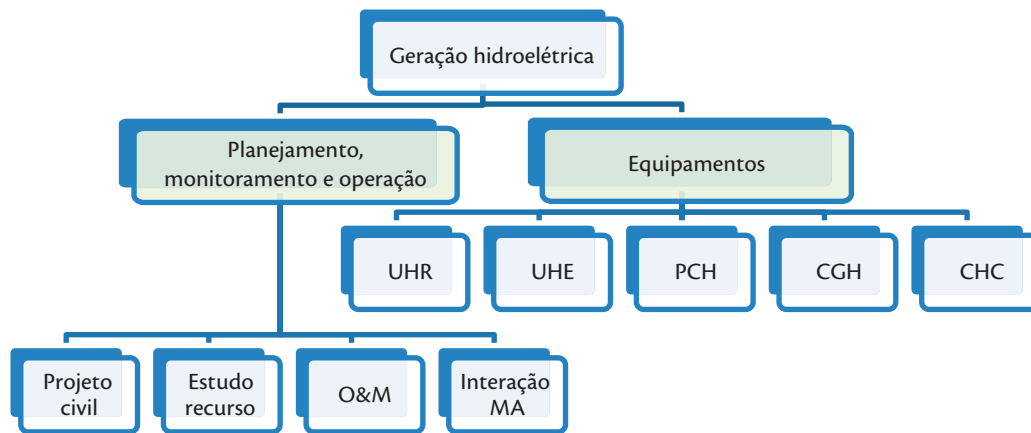


Figura 19 - Caracterização da macrotemática Geração Hidroelétrica (preenchimento na cor verde; temáticas, sem preenchimento; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.

Na temática equipamentos são abordadas as tecnologias de geração via turbinas hidráulicas. As respectivas siglas dizem respeito à:

- UHR: usina hidráulica reversível;
- UHE: usina hidroelétrica;
- PCH: conforme mencionado, pequena central hidroelétrica;
- CGE: central geradora hidroelétrica;
- CHC: central hidrocínética.



A temática planejamento, monitoramento e operação aborda as tecnologias relacionadas ao projeto civil das usinas, estudo dos recursos hidráulicos, sistemas de O&M e monitoramento de máquinas e componentes, além das questões relacionadas à convivência entre meio ambiente e usina hidroelétrica.

9.1. Visão de futuro

9.1.1. Cenário setorial

A evolução da demanda de energia elétrica até 2050 deve exigir algo entre 400 GW e 480 GW em capacidade instalada do SIN. Este cenário trará desafios como a diversificação e a ampliação do parque gerador para atender à demanda esperada. Neste contexto, a energia hidráulica ainda terá uma participação significativa na respectiva matriz, seguindo a atual tendência de mercado no qual esta macrotemática se manterá competitiva. A geração hidráulica continuará, portanto, a se desenvolver no campo de usinas de baixa queda, de grande porte, e de usinas reversíveis. Já no campo das pequenas usinas, poderá ser marginal.

9.1.2. Objetivo geral

Desenvolver tecnologias de turbinas dedicadas às usinas de baixa queda e às reversíveis. Também devem ser desenvolvidas tecnologias de manutenção de ativos e eficiência energética para novas usinas e tecnologias para a modernização do parque atual.

9.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes, que incluem:

Curto Prazo (2017-2020)

- Desenvolvimento de tecnologias de turbinas para baixa queda e elevada vazão para melhorar a relação custo-benefício;

- Desenvolvimento de tecnologias de usinas reversíveis (turbinas-bombas);
- Desenvolvimento de novas ferramentas de implantação, planejamento e operação de usinas;
- Desenvolvimento tecnológico de novas ferramentas e métodos de análise socioambientais e climatológicas;
- Tecnologias para aumentar a eficiência e a segurança da barragem e da estrutura civil da planta de geração hidroelétrica.

Médio Prazo (2020-2030)

- Aumento da eficiência do sistema de geração (turbinas e geradores e operação e manutenção) do parque atual;
- Otimização de sistemas para operacionalizar os geradores como compensador síncrono;
- Integração das tecnologias de geração hidroelétrica com outras tecnologias de geração, como a eólica e a solar, e armazenamento com foco na eficiência energética dos processos dessa usina;
- Integração das tecnologias de usinas reversíveis com outras tecnologias de geração, como a eólica e a solar, e armazenamento com foco na eficiência energética dos processos dessa usina;
- Desenvolvimento de turbinas hidrocínéticas;
- Desenvolvimento de usinas *Fishfriendly*;
- Incremento da capacidade de regularização de vazões das usinas, com foco na eficiência da geração.

Longo Prazo (2030-2050)

- Otimização ou aperfeiçoamento de turbinas de baixas quedas e elevadas vazões com foco na eficiência da conversão da energia hidráulica em mecânica;
- Desenvolvimento de tecnologias com DNA para a geração hidrocínética.



9.1.4. Fundamentação

Respeitando a legislação socioambiental, a usina hidroelétrica (UHE) continuará sendo a fonte principal de expansão de geração elétrica, ou pelo menos continuará sendo relevante nas próximas duas décadas. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), esta expansão ocorrerá até o limite inventariado hoje de 172 GW, o que deve ocorrer entre 2030 e 2040, a depender do ritmo de sua expansão. As próximas usinas a serem implantadas no Brasil serão as de baixas quedas e de grandes volumes, dadas as características hidrológicas remanescentes.

Usinas com reservatórios terão a sua importância aumentada, tanto para elevar a produção hidroelétrica quanto a eólica e a solar, e poderão tornar outras regiões importantes para o processo de regularização do sistema.

E a usina reversível será tratada como um item muito importante neste contexto e na repotenciação no item “modernização”.

Também haverá a exploração do potencial ainda disponível em PCH, com a entrada de maior número de empreendimentos. Todavia, segundo a EPE, essa velocidade de crescimento estará sujeita à capacidade dos órgãos ambientais de processar os pedidos de licença ambiental. A sua participação no parque gerador nacional deve continuar pouco expressivo em função do seu modesto potencial inventariado ainda a ser explorado (cerca 10 GW).

As centrais geradoras hidrelétricas (CGHs) e centrais hidrocinéticas (CHCs) merecem um esforço de pesquisa e a busca por alternativas economicamente atraentes. Mas sempre alocadas ao consumo direto ou instaladas diretamente à rede distribuída.

9.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática geração hidroelétrica foi caracterizado em resposta a um conjunto de métricas (ver Anexo) que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo, levando-se em conta o período até 2050.

A métrica: aumento do rendimento das máquinas hidráulicas apresenta em termos percentuais a evolução da eficiência da conversão da energia potencial hidráulica em energia mecânica, ao longo das próximas décadas, até 2050, e considera que no referido ano o rendimento das turbomáquinas alcance um patamar de 95%, no contexto geral da macrotemática.

No que diz respeito à métrica geração reversível, são considerados o desenvolvimento tecnológico e a implementação das tecnologias de geração reversível no parque hidroelétrico nacional. Esta métrica considera a evolução dessas questões em termos percentuais.

A métrica: turbinas Fishfriendly contabiliza, em termos percentuais, a ampliação do seu uso no parque de geração hidroelétrica nacional. O uso dessa tecnologia ocorre como meio de mitigar a mortalidade no curso da geração hidroelétrica, tornando essa fonte energética melhor adaptável às questões ambientais. Até 2050, estima-se que, no contexto da macrotemática, 100% dos novos empreendimentos de geração com baixa queda apresentem a tecnologia de turbinas *Fishfriendly*.

No que diz respeito às tecnologias de gestão e de manutenção dos ativos, a métrica convivência das diferentes tecnologias relaciona-se às tecnologias de integração de sistemas de gestão de ativos (como tecnologias de O&M, implantação, planejamento e monitoramento), que devem permitir a flexibilidade do uso de sistemas de diferentes fornecedores, trabalhando de forma harmônica. Esta característica de integração permite ao empreendimento operar com os sistemas de gestão de ativos que melhor lhe convier, sob os pontos de vista de qualidade tecnológica e de disponibilidade de mercado. A respectiva métrica, portanto, indica que a melhoria desses sistemas de integração deve ser contínua e, portanto, não há um limite para o seu desenvolvimento.

O aproveitamento da energia hidráulica à saída do canal de fuga das usinas é outro ponto a ser explorado, no contexto do projeto. A métrica que caracteriza essa tecnologia é a geração hidrocínética no canal de fuga e diz respeito à sua implementação nas usinas consideradas potenciais. Esta métrica apresenta, no contexto da macrotemática, que 90% das usinas com potencial para a instalação dessas tecnologias tenham os sistemas de geração hidrocínética à saída do canal de fuga até 2050. Esse aproveitamento energético pode ser considerado nas operações domésticas da usina ou como meio de geração para o bombeamento reverso de água, para reservatórios.

Outra importante métrica considerada neste estudo é a geração solar sobre os reservatórios. Esta métrica apresenta o percentual de aplicação das tecnologias de geração fotovoltaica a partir da área útil dos reservatórios hídricos das usinas. Estima-se, no contexto da macrotemática, que 90% das usinas com potencial apresentem essa tecnologia instalada em seus reservatórios até 2050.



A métrica redução dos custos de O&M diz respeito à possibilidade de mitigação dos custos de O&M com base em novos métodos e tecnologias de gerenciamento de operação e manutenção da usina. O desenvolvimento dessas questões é considerado importante ao fluxo financeiro da fonte, já que a redução dos custos com O&M pode torná-la ainda mais competitiva e, portanto, sustentável do ponto de vista negocial. Em vista disso, por meio desta métrica, observa-se que, considerando-se o contexto da macrotemática, até 2050 pode haver uma redução dos custos atuais com os sistemas de operação e de manutenção em até 50%, se forem consideradas as novas tecnologias de O&M e a sua evolução contínua.

O uso de compensadores síncronos tem sido especulado com o objetivo de compensar instantaneamente a queda de tensão em função das cargas reativas. Neste contexto, foi abordada a métrica compensador síncrono, que indica o percentual de usinas que estarão utilizando essa tecnologia até 2050. Estima-se, portanto, que 80% das usinas de grande porte tenham instalada a tecnologia de compensadores síncronos até 2050, considerando-se o contexto da macrotemática.

As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado estão apresentadas na planilha de indicadores, conforme instruções constantes na própria planilha. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias, as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e setor elétrico brasileiro potencializam a melhora ou a participação dessas questões no setor elétrico brasileiro, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

9.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste item são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associadas aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta: i) as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas; e ii) os fatores portadores de futuro que suportam essa evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

9.3.1. Temática planejamento, monitoramento e operação

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Projeto civil

As linhas consideradas nesse roadmap dizem respeito à melhoria ou à busca de novos arranjos civis e de materiais pode ser caracterizado ao longo dos próximos anos, até 2050, tal qual é apresentado no Gráfico 74.

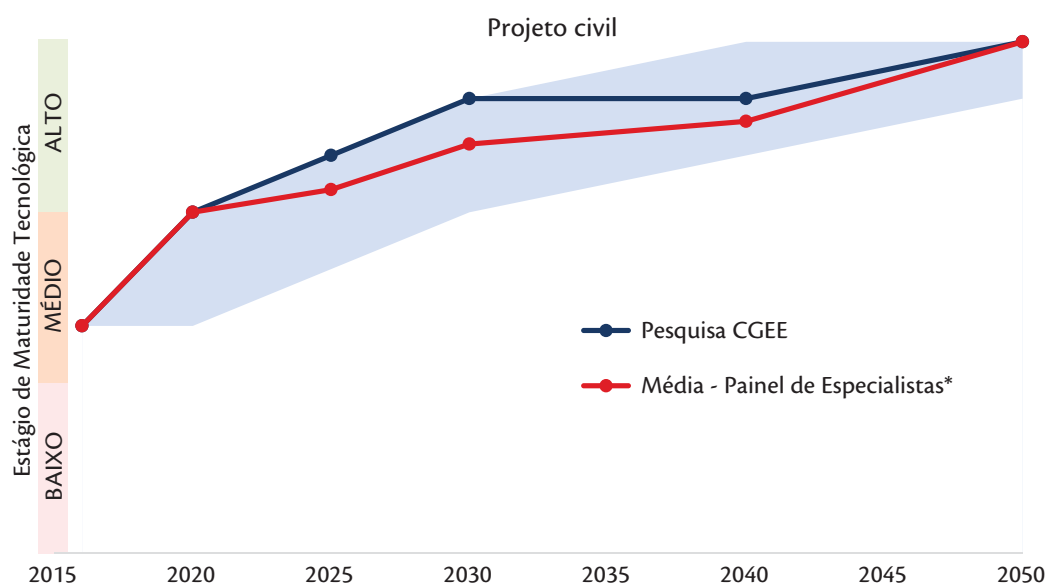


Gráfico 74 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Projeto Civil

Fonte: Elaboração própria.



Rota - Interação com o meio ambiente

As pesquisas consideradas nesse roadmap dizem respeito, basicamente, à mitigação do impacto sobre o ambiente e à minimização do impacto que o ambiente tem sobre as instalações. Ver Gráfico 75.

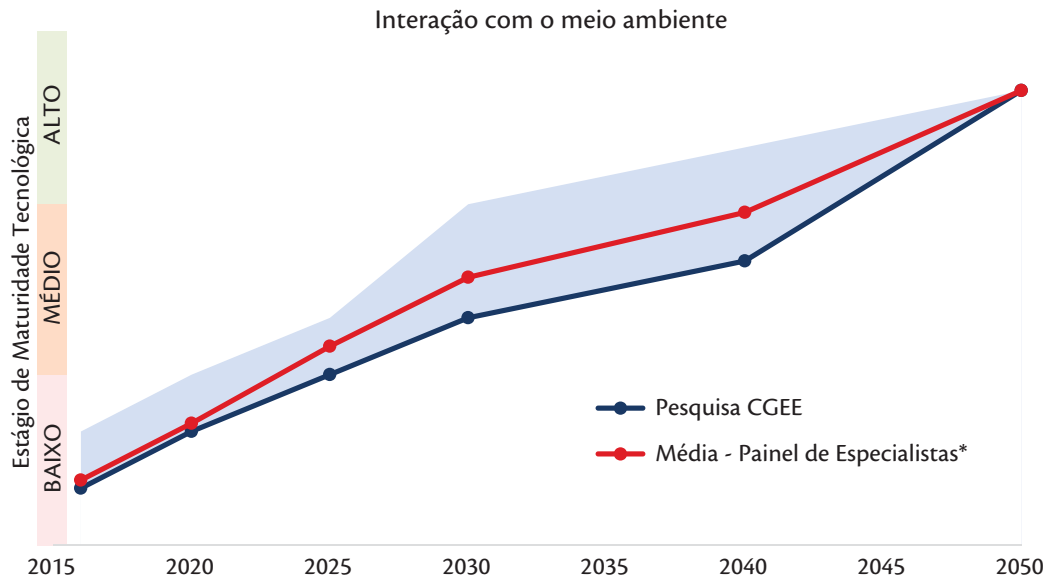


Gráfico 75 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Interação com o Meio Ambiente

Fonte: Elaboração própria.

Rota - O&M

As linhas de pesquisa e desenvolvimento consideradas nesse roadmap contemplam estudos voltados à TI, sistemas de monitoramento do ativo (diagnóstico, operação, manutenção), proteção e segurança física do empreendimento, comunicação e metrologia, dentre outros. Neste contexto, a curva evolutiva apresentada no gráfico 72 considerou essas questões, principalmente aquelas tecnologias de monitoramento do ativo envolvendo TI.

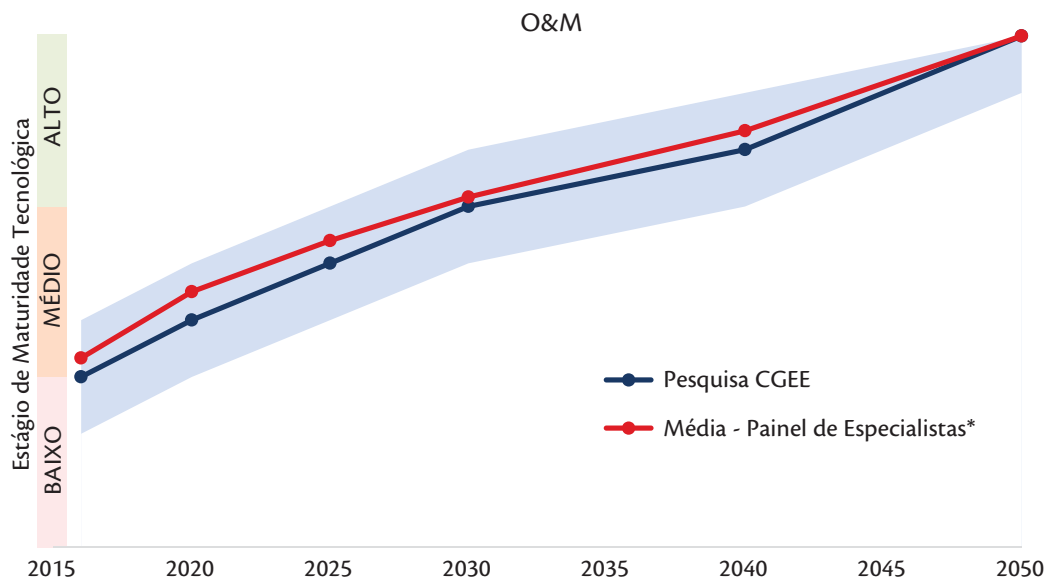


Gráfico 76 - Evolução da maturidade tecnológica da rota O&M

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Estudo do recurso hidráulico

A informação sobre a disponibilidade do recurso energético é indispensável à operação da usina hidroelétrica. As tecnologias de previsão do recurso levam em conta o regime de chuvas sobre as vazões dos rios e o impacto que fenômenos como o El Niño têm sobre a variabilidade ou a disponibilidade desse recurso. Além disso, os estudos voltados a essa questão têm considerado a possibilidade do uso múltiplo da água (reservatórios), e a complementação desse recurso com outras fontes como a eólica e a solar. Considera-se também o mapeamento dos recursos hidráulicos para a geração de baixa queda e via energia das correntes. Pensando essas questões, optou-se por caracterizar o desenvolvimento da maturidade da rota estudo do recurso hidráulico a partir das pesquisas sobre a previsão do recurso hídrico. Esta caracterização está apresentada no Gráfico 77.

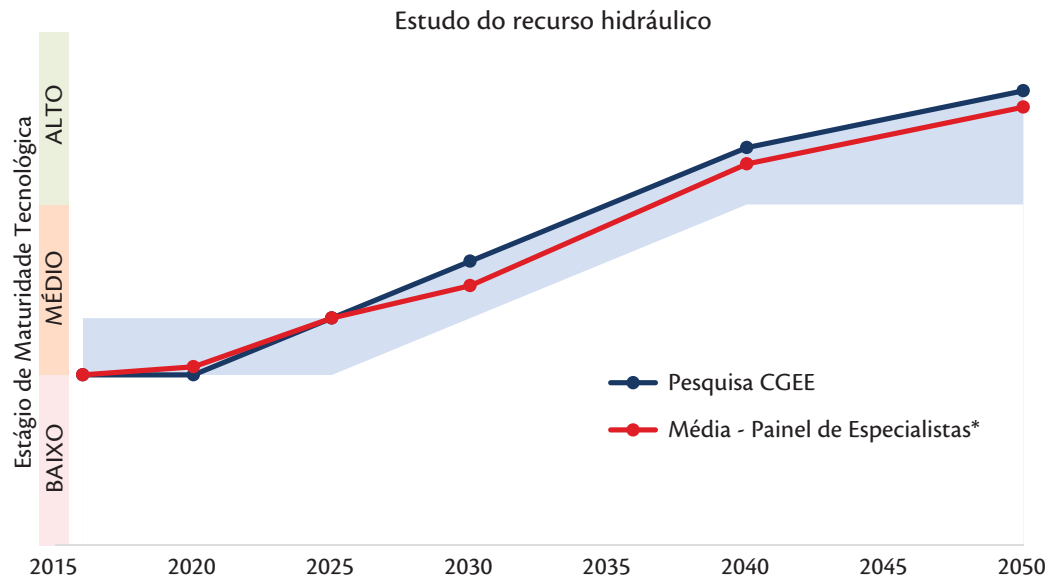


Gráfico 77 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudo do Recurso Hidráulico

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Projeto Civil, Interação com o Meio Ambiente (MA), O&M, Estudo do Recurso Hidráulico

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Planejamento, monitoramento e operação	Projeto civil	Fatores portadores de futuro	Características de relevo e hidrológica definidas e tecnologias de construção de usinas e barragens ambientalmente amigáveis e planejamento sócio ambiental definidos e homologados	Técnicas de logística e construção civil testados e com elevada confiabilidade	Novos materiais de construção civil desenvolvidos	Métodologias de desenvolvimento contínuo das tecnologias de construção civil definidos	Manutenção do fomento ao desenvolvimento de tecnologias para a construção civil	Manutenção do fomento ao desenvolvimento de tecnologias para a construção civil
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
	Interação MA	Fatores portadores de futuro	Técnicas de mapeamento do recurso hídrico e mapeamento do bioma em estado avançado	Tecnologias de interação entre usinas e meio ambiente em desenvolvimento avançado	Estudo avançado de tecnologias de proteção dos ativos da usina com foco na conservação, devido ao contato com o meio ambiente	Tecnologias de interação do empreendimento com o meio ambiente em estágio de teste	Tecnologias de interação do empreendimento com o meio ambiente consolidadas e em uso.	Manutenção do fomento ao desenvolvimento de tecnologias para a interação entre o empreendimento e o meio ambiente
		Maturidade	BAIXO			MÉDIO		ALTO
	O&M	Fatores portadores de futuro	Mapeamento das oportunidades de otimização ou desenvolvimento de tecnologias de O&M e fomento ao desenvolvimento da CT&I e da cadeia produtiva	Oportunidades de otimização ou desenvolvimento de tecnologias de O&M consolidadas	Centro de testes dedicados à O&M de usinas hidroelétrica disponíveis e com competência (RH)	Tecnologias de O&M em nível avançado de desenvolvimento (testes para homologação)	Sistemas de implantação das novas tecnologias de O&M nas usinas. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota	
		Maturidade		MÉDIO			ALTO	
	Estudo do recurso hidráulico	Fatores portadores de futuro	Fomento à construção de estações de medição do recurso hidráulico e tecnologias de medição do recurso avançadas	Estações de medição do recurso hídrico instalados e operantes em nível de testes	Tecnologias avançadas e metodologias de análise de dados dos estudos do recurso	Manutenção do fomento ao funcionamento das estações de medição e caracterização do recurso hídrico e ao fomento dos estudos para a operação dos sistemas de geração.	Manutenção do fomento ao funcionamento das estações de medição e caracterização do recurso hídrico e ao fomento dos estudos para a operação dos sistemas de geração.	Manutenção do fomento ao funcionamento das estações de medição e caracterização do recurso hídrico e ao fomento dos estudos para a operação dos sistemas de geração.
		Maturidade		MÉDIO			ALTO	

Fonte: Elaboração própria.



9.3.2. Temática equipamentos

Roadmap tecnológico

Rotas - CGH, UHE e PCH

Para essas rotas, são observados a otimização das máquinas de geração hidráulica (novos rotores, mitigar perdas por atritos em mancais etc.), com foco na eficiência do processo de transformação energética; os estudos para elevar a confiabilidade das máquinas geradoras; e as novas tecnologias de repontenciação de máquinas, além de tecnologias que permitam diminuir o tempo de parada das máquinas e os custos com O&M. Além disso, os estudos relativos à evolução dessas rotas tecnológicas têm focado no desenvolvimento de turbinas hidráulicas para baixa queda e em tecnologias de integração de fontes de energia (PCH-híbrido) e de sistemas de armazenamento. O segmento de geração de hidroeletricidade via baixa queda d'água demandará especial atenção por parte da P&D nacional, haja vista a possibilidade de novos empreendimentos para a geração nesse segmento. Considerando-se esses aspectos tecnológicos, é apresentado no Gráfico 78, Gráfico 79 e Gráfico 80 o desenvolvimento da maturidade tecnológica das respectivas rotas.

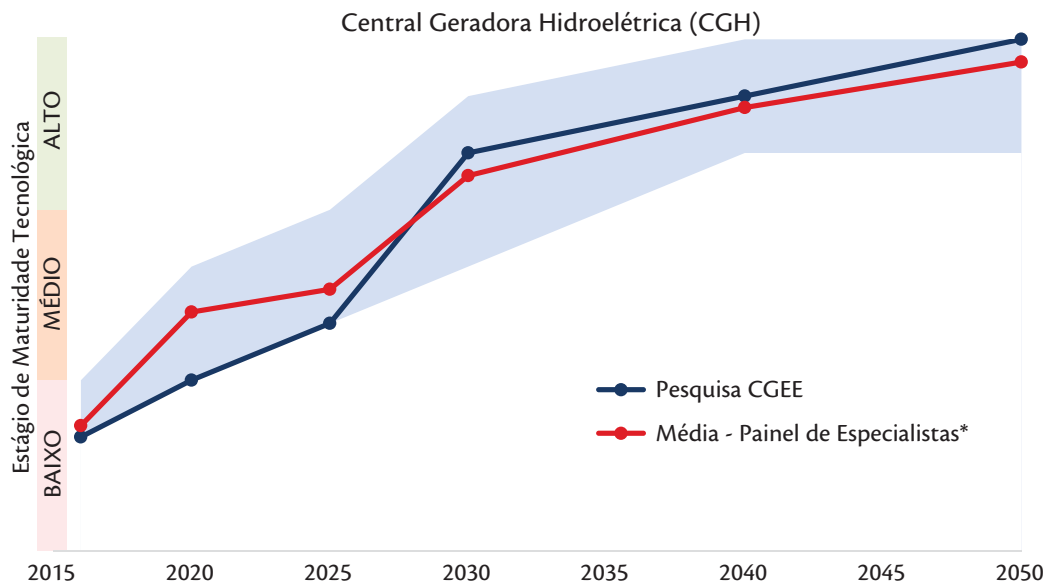


Gráfico 78 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Central Geradora Hidroelétrica (CGH)

Fonte: Elaboração própria.

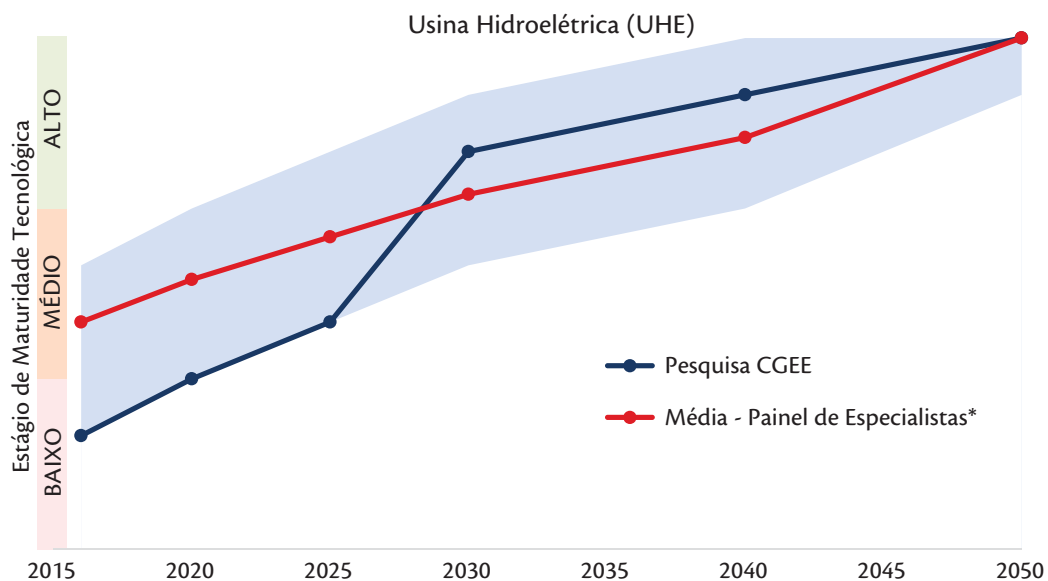


Gráfico 79 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Usina Hidroelétrica (UHE)

Fonte: Elaboração própria.

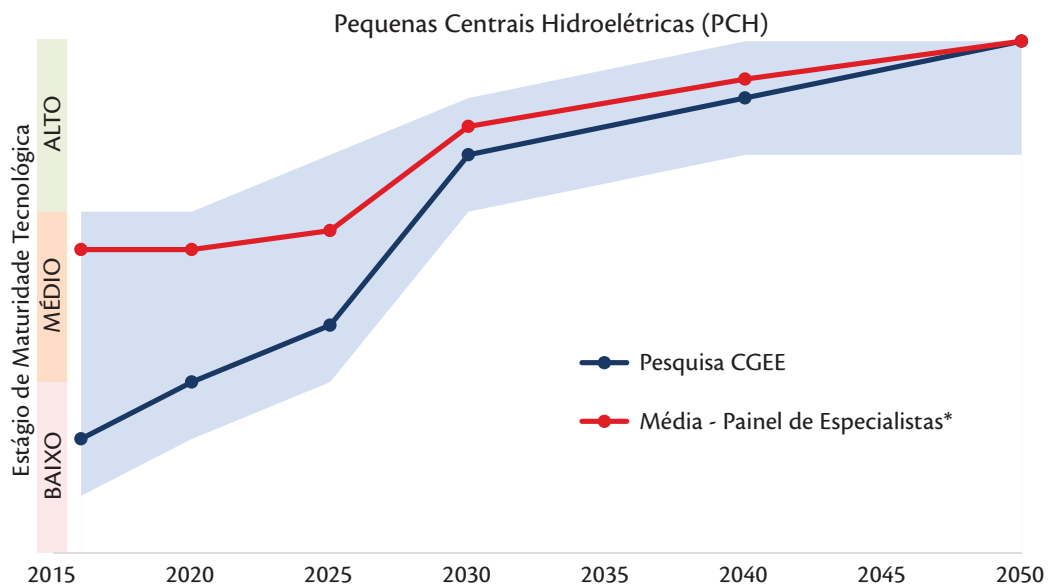


Gráfico 80 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH)

Fonte: Elaboração própria.



Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 40.

Tabela 40 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas CGH, UHE e PCH

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Equipamentos	CGH	Fatores portadores de futuro	Estudo de viabilidade para a repotenciação de máquinas hidráulicas em fase de consolidação.	Desenvolvimento de metodologias e tecnologias de auxílio à repotenciação de máquinas. Novas técnicas e desenhos para a otimização ou repotenciação de turbomáquinas desenvolvidas. Novos sistemas de O&M e monitoramento de máquinas. Novos sistemas de gestão do ativo (usina) desenvolvidos.	Estudo avançado para a integração de sistemas de geração de energia eficientes para o uso doméstico da usina, estudo avançado de caracterização das oportunidades de ações de eficiência energética nas usinas e sistemas de geração do tipo fishfriendly modulos para a operação.	Metodologias de repotenciação de máquinas definidas, metodologias de aplicação de recursos para eficiência energética da usina definidas e metodologias de implantação dos sistemas fishfriendly de geração.	Metodologias e técnicas de análise de resultados das ações de eficiência energética dos sistemas da usina, repotenciação de máquinas hidráulicas e de sistemas de O&M e monitoramento.	Sistemas de O&M, monitoramento e gestão de ativos funcionais e confiáveis. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.
		Maturidade		BAIXO	MÉDIO		ALTO	
		Fatores portadores de futuro	Estudo de viabilidade para a repotenciação de máquinas hidráulicas em fase de consolidação.	Desenvolvimento de metodologias e tecnologias de auxílio à repotenciação de máquinas. Novas técnicas e desenhos para a otimização ou repotenciação de turbomáquinas desenvolvidas. Novos sistemas de O&M e monitoramento de máquinas. Novos sistemas de gestão do ativo (usina) desenvolvidos.	Estudo avançado para a integração de sistemas de geração de energia eficientes para o uso doméstico da usina, estudo avançado de caracterização das oportunidades de ações de eficiência energética nas usinas, sistemas de geração do tipo fishfriendly modulos para a operação, estudos avançados de turbinas mais eficientes para baixas quedas.	Metodologias de repotenciação de máquinas definidas, metodologias de aplicação de recursos para eficiência energética da usina definidas e metodologias de implantação dos sistemas fishfriendly de geração.	Metodologias e técnicas de análise de resultados das ações de eficiência energética dos sistemas da usina, repotenciação de máquinas hidráulicas e de sistemas de O&M e monitoramento.	Sistemas de O&M, monitoramento e gestão de ativos funcionais e confiáveis. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.
	Maturidade		BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	PCH	Fatores portadores de futuro	Mapeamento do recurso hidráulico consolidado	Planejamento de implantação de PCH's consolidado, estudo de novos desenhos de turbomáquinas.	Estudo avançado de repotenciação de máquinas hidráulicas, estudos avançados de ações de eficiência energética em PCHs, caracterização de turbomáquinas mais tecnológicas e sistemas de O&M, monitoramento e gestão de ativos desenvolvidos.	Protótipo de turbomáquinas para estudos em operação, tecnologias de repotenciação de máquinas e métodos para ações de eficiência energética em usinas desenvolvidos e selecionados	Metodologias de implantação de sistemas de O&M, monitoramento e gestão de ativos consolidada, metodologias e técnicas de implementação de ações de eficiência energética consolidadas e metodologias e técnicas de implantação de máquinas ou repotenciação de máquinas consolidadas	Sistemas de O&M, monitoramento e gestão de ativos funcionais e confiáveis. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.
		Maturidade		BAIXO	MÉDIO		ALTO	
		Fatores portadores de futuro						
	Maturidade			BAIXO	MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

Rota – CHC

Essa tecnologia possui destaque no cenário futuro da geração hidroelétrica. Esses empreendimentos, por serem construídos em menores escalas e utilizarem tecnologias de turbinas simples do ponto de vista de instalações e de operação, terão participação na geração distribuída e na produção de energia elétrica associada a outras fontes (sistemas híbridos). Neste contexto, a curva de evolução da maturidade da respectiva rota tecnológica diz respeito às pesquisas relacionadas à produção de sistemas de geração mais eficientes e aos arranjos tecnológicos para a operação junto a outras tecnologias.

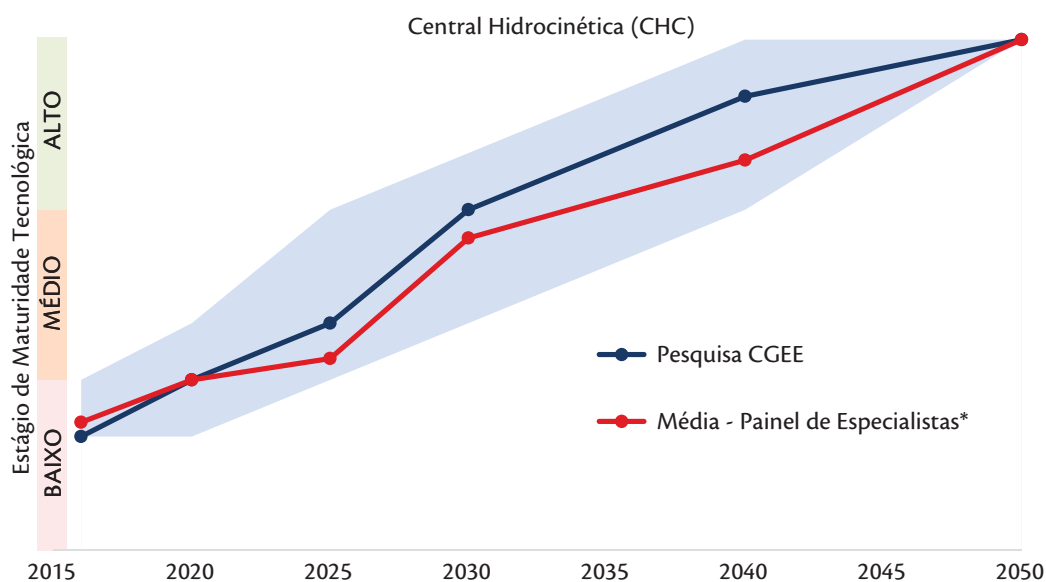


Gráfico 81 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Central Hidrocinética (CHC)

Fonte: Elaboração própria.

Rota – UHR

Essa tecnologia terá participação no parque de geração hidroelétrica em função, principalmente, da capacidade de armazenamento de energia, com independência das questões sazonais. Embora a concepção de gerar eletricidade via energia potencial e em seguida reabastecer os reservatórios por meio de sistemas de bombeamento seja factível, essa tecnologia pode apresentar um custo de operação que inviabiliza o empreendimento. Neste sentido, são estudados meios de bombear a água de volta ao reservatório com o uso de sistemas eólico ou solar, e afins. Considerando-se esta questão,



entende-se que a evolução tecnológica da respectiva rota ocorrerá tal qual apresentado no Gráfico 82 e levará em conta o desenvolvimento de tecnologias de integração de fontes, o desenvolvimento de conversores que trabalhem como turbinas e bombas, além do aprimoramento dos sistemas de O&M.

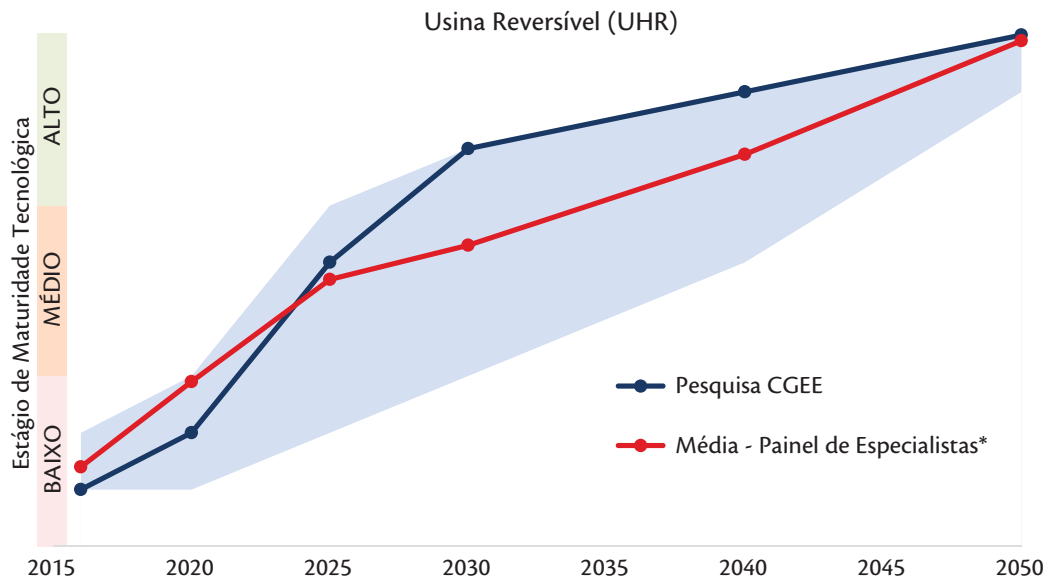


Gráfico 82 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Usina Reversível (UHR)

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 41.

Tabela 41 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas CHC e UHR

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Equipamentos	CHC	Fatores portadores de futuro	Mapeamento do recurso hidráulico consolidado e estudos avançados de turbinas hidrocínéticas (maior eficiência, confiabilidade, não agressiva ao meio ambiente), plano de negócios aprovado.	Estudos avançados de sistemas de geração via redes de turbinas hidrocínéticas, estudos avançados de transmissão de potência mecânica e elétrica dos sistemas hidrocínéticos, desenho de usinas com DNA de geração hidrocínética, estudos para o uso de sistemas de armazenamento para mitigar intermitências e garantir despachabilidade, estudos de sistemas de integração entre fontes	Protótipos desenvolvidos e testados em laboratórios, protótipos em escala para testes de análises de redes de geração hidrocínética, estudos avançados de implantação das usinas hidrocínéticas, permissões ambientais aprovadas e estudos avançados para implementar a tecnologia de geração hidrocínética no canal de fuga das usinas hidroelétricas.	Protótipos para análise em operação real, sistemas de O&M, monitoramento e gestão de ativos definidos	Tecnologias desenvolvidas e testadas em meio real, sistemas de O&M, monitoramento e gestão de ativos funcionais e confiáveis, obras civis com DNA de usinas hidrocínéticas, estratégias de implementação da usina e dos sistemas de integração entre outras fontes e sistemas de armazenamento definidos	Metodologias e tecnologias de implementação de usinas hidrocínéticas estabelecidas. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	UHR	Fatores portadores de futuro	Estudo da operação da geração incluindo sistemas de armazenamento via usinas reversíveis	Licenças ambientais homologas, estudos de implantação de usinas reversíveis em estágio avançado, desenvolvimento de tecnologias de O&M, monitoramento e de gestão de ativos avançado, características tecnológicas de bombeamento e geração definidas (tecnologias mais eficientes e sistemas de integração entre fontes de energia)	Protótipos de sistemas de geração em usinas reversíveis desenvolvidos para testes em laboratórios (sistemas de integração entre fontes, turbinas reversíveis de elevada eficiência, tecnologias de geração solar fotovoltaica e eólica avançadas)	Protótipos em escala real de operação de usinas reversíveis, com todas as possibilidades de cogeração via fontes auxiliares (para o bombeamento) e sistemas de O&M, monitoramento e sistemas de gestão de ativos para estudos	Tecnologias com DNA de usinas reversíveis consolidadas.	Tecnologias de implantação de usinas reversíveis desenvolvidas. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			

Fonte: Elaboração própria.



9.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro.

Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas conforme apresentado na Tabela 42.

Tabela 42 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Interação com o ambiente	Planejamento, monitoramento e operação
2	UHR	Equipamentos
3	Estudo do recurso hidráulico	Planejamento, monitoramento e operação
4	CHC	Equipamentos
5	O&M	Planejamento, monitoramento e operação
6	UHE	Equipamentos
7	Projeto civil	Planejamento, monitoramento e operação
8	PCH	Equipamentos
9	CGH	Equipamentos

Fonte: Elaboração própria.

Os empreendimentos de geração hidroelétrica, embora utilizem uma fonte renovável, apresentam um impacto considerável ao meio ambiente. A presença de um grande empreendimento descaracteriza a região próxima à usina (formação de lagos e destruição de habitats), gera impacto direto à natureza migratória de espécies, propicia a formação de zonas térmicas, dentre outros. Além disso, é importante observar a influência do ambiente na conservação dos sistemas de geração das usinas. Neste sentido, faz-se necessário desenvolver tecnologias que mitiguem os impactos gerados na implementação e na operação desses empreendimentos, como primeiro passo para a utilização dessa fonte.

Ainda sob esse aspecto, os impactos ao meio ambiente podem ser mitigados com o uso de usinas reversíveis, haja vista a possibilidade de menor intrusão do empreendimento nos sistemas de rios nacionais. É importante observar o papel dessas tecnologias quando se considera a questão do armazenamento de energia e de operação do SIN. Além disso, como nos últimos anos as usinas hidrelétricas estão sendo projetadas com reservatórios muito pequenos ou até sem reservatórios, e com a entrada em operação de fontes térmicas, torna-se interessante a construção de usinas reversíveis bombeando água quando há sobra de energia, um processo de baixo custo.

A vocação hidroelétrica é fato no Brasil. Embora os investimentos em grandes centrais hidroelétricas de elevada cota tendam a diminuir, principalmente pela redução dos potenciais sítios de implantação dessas usinas, o uso de tecnologias de geração em baixa queda e em geração para o aproveitamento da energia cinética dos rios será promissor. Assim, é necessário que haja informações a respeito do recurso hídrico, com confiabilidade, para que esses empreendimentos possam ser implementados. Além disso, o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias de mapeamento dos recursos e de previsão de chuvas, com foco na precisão dos resultados, é e sempre serão bem-vindos para garantir a operação segura de geração, transmissão e distribuição da energia hidroelétrica no País.

A perenidade da geração hidroelétrica depende, também, das tecnologias de O&M. O desenvolvimento de novas tecnologias ou o aprimoramento dos sistemas de operação e de manutenção das usinas propiciam qualidade na geração da hidroeletricidade e confiabilidade no despacho dessa energia, além permitirem mitigar os custos operacionais.



Capítulo 10



Capítulo 10

Macrotemática Energia Nuclear

As preocupações com as alterações climáticas, com a qualidade do ar, com a segurança no abastecimento de eletricidade e com a ininterrupta volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis indicam a tendência de utilização crescente da fonte nuclear. O ano de 2016 apresentou a fonte nuclear como a segunda de maior crescimento no consumo de eletricidade no mundo, só perdendo para as renováveis. Em 2040, o consumo de eletricidade de fonte nuclear deve dobrar em relação a 2010. As 447 usinas nucleares em operação no mundo responderam por 11,5% da geração de energia elétrica no planeta em 2016. No total, há 60 usinas em construção no mundo. No caso do Brasil, deverá ser definida uma expansão dimensionada por questões de segurança energética, metas de redução de emissões, manutenção de mão de obra especializada e economicidade do ciclo do combustível nuclear.³⁶

Para direcionar as considerações que serão feitas neste trabalho, as respectivas questões foram organizadas em temáticas e rotas tecnológicas, tal qual apresentado na Figura 20.

36 Cenarização Geral do Setor (Livro - Documento executivo).

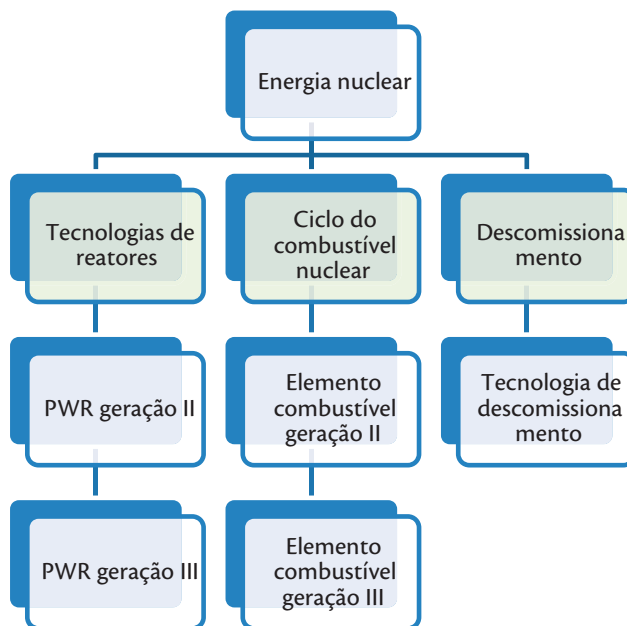


Figura 20 - Caracterização da macrotemática energia nuclear (preenchimento na cor verde, temáticas; abaixo, rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.

Para a caracterização da macrotemática, foi adotada a classificação internacional utilizada pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) e pela *Nuclear Energy Agency* (OECD/IEA/NEA). As temáticas consideradas são: tecnologias de reatores nucleares, tecnologias do ciclo do combustível, tecnologias de gestão de rejeitos e combustíveis usados, e tecnologias de descomissionamento.

A temática referente às tecnologias de reatores nucleares envolve tanto os reatores de fissão quanto os de fusão nuclear. Os reatores de fissão têm uma classificação geral quanto à geração a que pertencem. Reatores da Geração I foram os primeiros a serem desenvolvidos nas décadas de 1950 e 1960 e já foram todos desativados. Os reatores da Geração II foram desenvolvidos na década de 1970 e são os mais comuns em operação atualmente. Sua vida útil era estimada em 40 anos, porém muitos estão tendo seu período de operação prolongado em 20 anos. Os reatores da Geração III e III+ são considerados uma evolução a partir dos reatores de segunda geração, com segurança reforçada e vida útil prevista de 60 anos, o que provavelmente poderá ser ampliado. A maioria ainda está em construção. Reatores da Geração IV ainda estão em estudo e nenhum deve entrar em operação antes de 2030. A fusão nuclear é uma tecnologia que não estará disponível para uso comercial até 2050, portanto não está sendo considerada como linha de pesquisa no presente projeto.



No cenário internacional, a temática referente às tecnologias do ciclo do combustível nuclear consiste de três etapas. A etapa inicial (*front end*), que inclui a extração de minério de urânio, conversão de urânio, enriquecimento de urânio e fabricação do Elemento Combustível; a etapa de geração de energia, que ocorre dentro dos reatores nucleares; e a etapa final (*back end*), na qual os Elementos Combustíveis usados são removidos do reator e armazenados de forma apropriada. Eles serão reprocessados ou armazenados em um repositório intermediário ou final. No contexto desse trabalho, a temática do ciclo do combustível nuclear trata da etapa inicial do ciclo (*front end*), etapa de geração de energia e vai até o armazenamento, processamento e gerenciamento de combustíveis usados.

A temática referente às tecnologias de descomissionamento diz respeito ao processo de desmantelamento e descontaminação de uma usina nuclear no final de sua vida operacional e à restauração do local para outros usos cada vez mais importantes na atividade do setor nuclear nas próximas décadas. Em dezembro de 2014, 150 reatores nucleares de geração elétrica tinham sido permanentemente desligados e estavam em várias fases de desmantelamento.

10.1. Visão de futuro

10.1.1. Cenário setorial

No horizonte 2050, prevê-se que o aumento de consumo de eletricidade vai demandar uma capacidade instalada entre 400 MW a 480 MW no SIN, e que a participação da fonte térmica terá um percentual importante e estratégico na matriz de geração.³⁷ Sendo praticamente isenta de emissão de gases de efeito estufa, com fator de capacidade superior a 90%, a opção nuclear pode oferecer importante contribuição para a transição hidrotérmica do sistema elétrico brasileiro, com potencial para fornecer eletricidade a custos competitivos entre as térmicas e sem negligenciar o enfrentamento das questões relativas às mudanças climáticas.

10.1.2. Objetivo geral

Aumentar a competitividade e reduzir o custo da geração nucleoeleétrica pelo aumento de desempenho e extensão de vida das usinas existentes, desenvolvimento, aprimoramento ou adequação de processos,

37 Cenarização Geral do Setor (Livro - Documento executivo).

requisitos e tecnologias para a escolha das novas usinas e dos seus respectivos sítios, nacionalização de componentes e processos de fabricação de elementos combustíveis, gestão de rejeitos e combustíveis usados e seleção de tecnologias de descomissionamento e desenvolvimento, onde couber, de reatores nucleares de variados portes.

10.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes, que incluem:

Curto Prazo (2017-2020)

- Desenvolver ou aprimorar processos e tecnologias para a gestão de rejeitos e de combustíveis usados;
- Desenvolver, aprimorar ou adequar processos, materiais e equipamentos para a extensão de vida e o aumento de desempenho de usinas de Geração II.

Médio Prazo (2020-2030)

- Desenvolver, aprimorar ou adequar insumos, processos produtivos, componentes e testes de qualificação para o desenvolvimento de Elementos Combustíveis utilizados nas usinas brasileiras de Geração II;
- Desenvolver, aprimorar ou adequar processos, requisitos e tecnologias para a avaliação e a seleção de novas usinas de Geração III/III+;
- Desenvolver, aprimorar ou adequar processos e tecnologias para a seleção de sítios de novas usinas de Geração III/III+;
- Desenvolver combustíveis avançados de alta queima de Geração II;
- Desenvolver, aprimorar ou adequar processos, requisitos e tecnologias para o descomissionamento de usinas brasileiras;
- Desenvolver tecnologias para o reaproveitamento (inclui outras aplicações) dos rejeitos.



Longo Prazo (2030-2050)

- Desenvolver, aprimorar ou adequar insumos, processos produtivos, componentes e testes de qualificação de Elementos Combustíveis de usinas brasileiras de Geração III/III+;
- Desenvolver combustíveis avançados de alta queima de Geração III/III+.

10.1.4. Fundamentação

Os Sistemas de Geração Nuclear são os que utilizam a energia proveniente da fissão do urânio em reator nuclear. O princípio de funcionamento de uma usina nuclear é similar ao de uma usina termelétrica convencional, se diferenciando na etapa de geração de calor - na usina nuclear, o calor é gerado pela fissão³⁸ do urânio em um reator. As etapas posteriores, comuns com as das usinas termoeletricas, são a produção de vapor e o acionamento de uma turbina acoplada a um gerador de eletricidade.

No sistema PWR, o urânio enriquecido (combustível radioativo) é atingido por nêutrons em alta velocidade no interior do núcleo do reator. Um elemento moderador é utilizado ao redor do combustível de modo a controlar a energia cinética dos nêutrons e assim garantir a ocorrência de uma reação em cadeia. Barras de controle são inseridas ou retiradas do interior do núcleo visando controlar a velocidade das reações, ou interrompê-las. Com a fissão dos átomos de urânio, calor é liberado aquecendo a água do circuito primário (em contato direto com o reator) a uma temperatura de aproximadamente 320 °C, sob uma pressão de 157 atmosferas. Um pressurizador controla a pressão da água, impedindo que se vaporize. Em seguida, a água passa por tubulações e vai até o gerador de vapor, onde vaporiza a água do circuito secundário, sem que haja contato físico entre os dois circuitos. O vapor gerado aciona uma turbina, que movimenta o gerador e produz corrente elétrica. Um condensador na saída da turbina resfria o vapor e o recoloca em circulação. Para a proteção do reator e o controle de eventual vazamento de radiação, em torno do reator é construída uma estrutura de contenção, normalmente feita de concreto e aço (Aneel 2005).

O setor de geração nuclear no Brasil tem a perspectiva de consolidar e expandir a sua participação na matriz elétrica brasileira como uma das fontes de geração de base, considerando a crescente necessidade de usinas termoeletricas prevista com o aumento da capacidade instalada no horizonte 2050.³⁹ Atualmente, a capacidade nuclear instalada e em construção no Brasil está apresentada na Tabela 43.

38 Fissão é o processo de quebra dos núcleos de átomos instáveis pelo bombardeamento de partículas, resultando na liberação de grandes quantidades de energia na forma de calor.

39 Cenarização Geral do Setor (Livro - Documento executivo-).

Tabela 43 - Capacidade nuclear instalada e em construção no Brasil

Usina	Capacidade	Início de operação
Angra 1	640 MW	1985
Angra 2	1350 MW	2000
Angra 3	1405 MW	2024

Fonte: Eletronuclear (2017)

A energia nuclear respondeu em 2014 por 2,87% da geração do SIN e, particularmente, no que diz respeito ao Rio de Janeiro, corresponde a um terço do consumo cativo total de energia elétrica do estado.

A Tabela 44 mostra um cenário compatível com o texto de Cenarização Geral do Setor para a geração nucleoeleétrica. Não obstante os valores das potências de Angra 1, 2 e 3 não corresponderem com exatidão aos valores atuais, e a potência das usinas de nova geração ainda não estar definida, os valores constantes na tabela explicitam o desafio de expansão do ciclo do combustível nuclear, em face do aumento da geração nucleoeleétrica. Neste desafio, os objetivos específicos elencados surgem como ações elegíveis para um eventual recebimento de recursos no escopo de PD&I da Aneel.

Tabela 44 - Evolução da geração e do ciclo do combustível nuclear no Brasil

Reator	MW	Início de operação*	Concentrado t (U3O8)/ano	Conversão t (UF6)/ano	Enriquecimento (t)
Angra 1	660	em operação	179	225	16,9
Angra 2	1.300	em operação	358	449	33,7
Angra 3	1.300	2024	358	449	33,7
Nuclear 1	1.125	2030	315	395	29,6
Nuclear 2	1.125	2033	315	395	29,6
Nuclear 3	1.125	2036	315	395	29,6
Nuclear 4	1.125	2039	315	395	29,6
Nuclear 5	1.125	2042	315	395	29,6
Nuclear 6	1.125	2045	315	395	29,6
Total	10.010		2.785	3.496	262

Fonte: Projeto de Conversão da INB.

* Tendo em vista que a fonte é de 2011, as datas de início de operação das novas usinas foram adaptadas para os dados de 2017.



As usinas Angra 1, 2 e 3 têm uma vida nominal de projeto de 40 anos, mas as avaliações de engenharia de grande número de usinas de Geração II no mundo estabeleceram que muitas podem operar por mais tempo. Nos EUA, foram concedidas renovações de licença para mais de 75 reatores que estenderam as suas vidas operacionais dos 40 anos originais para 60 anos. Os operadores da maioria das outras usinas no mundo, incluindo a Eletrobrás Eletronuclear, deverão solicitar extensões semelhantes. Essas licenças de extensão em cerca de 20 anos justificam a P&D e despesas de capital significativas para a nacionalização e a substituição de equipamentos desgastados e sistemas de controle desatualizados.⁴⁰

Entre 1990 e 2010, a produção de eletricidade de fonte nuclear no mundo aumentou em 755 bilhões de kWh (40%). As contribuições relativas para este aumento foram: novas usinas 36%, aumento de potência das usinas existentes 7% e aumento de disponibilidade 57%. No Brasil, como resultado de investimentos em melhoria de tecnologias, processos e equipamentos, a disponibilidade de Angra 1 tem melhorado continuamente e a média do seu fator de capacidade nos últimos 15 anos é de 79,44%. A expectativa da Eletronuclear é operar Angra 2 à potência máxima, continuamente, como nas usinas alemãs. O fator de capacidade previsto é em torno de 90,14%. Investimentos em P&D nessa área demonstram produzir retornos concretos no aumento da capacidade de geração.

No cenário internacional, considerando-se a nova geração de usinas nucleares, os esforços dos investidores, projetistas, operadores e reguladores tiveram como objetivo o desenvolvimento de unidades padronizadas de Geração III/III⁺ que teriam uma ampla aceitação e utilização no mundo. Houve, portanto, um entendimento de que requisitos comuns, em escala mundial adaptados às especificidades locais, seriam essenciais para orientar os processos de compra de novas usinas nucleares e com isto tornar a opção nuclear mais competitiva. A partir de uma base excepcional de dados de informações e lições aprendidas em 40 anos de experiência na operação de mais de cem usinas de água leve nos EUA e muitas mais no exterior, os EUA e a Europa consolidaram os processos, requisitos e tecnologias para a seleção de novas usinas de Geração III/III⁺, na forma de documentos de requisitos para utilitários. O Brasil deverá nacionalizar este conhecimento para a avaliação e a seleção da nova geração de usinas nucleares brasileiras, para que venham melhor atender às necessidades do sistema elétrico nacional.

A localização de usinas nucleares é uma parte essencial de um programa nuclear e requer uma análise minuciosa, além de interações com as comunidades locais com grande antecipação a qualquer decisão. Nacionalizar processos e tecnologias para a seleção de sítios de novas usinas de Geração III/III⁺ constitui um fator crítico de sucesso para a instalação da nova geração de usinas nucleares no Brasil.

40 Idem.

O Elemento Combustível Nuclear é uma estrutura metálica, com até cinco metros de altura, formada por um conjunto de tubos, chamadas varetas, dentro das quais são colocadas pastilhas de urânio enriquecido entre 2% a 5%.

Na Fábrica de Combustível Nuclear (FCN - Componentes e Montagem) das Indústrias Nucleares do Brasil (INB), em Resende - RJ, são produzidos componentes com alta precisão dimensional e montado o Elemento Combustível, obedecendo a rigorosos padrões de qualidade. Os elementos combustíveis produzidos pela INB para as usinas de Angra 1 (modelo 16NGF⁴¹ - projeto Westinghouse) e Angra 2 (modelo High Thermal Performance (HTP) - projeto Siemens) são de diferentes tecnologias, e por isso cada uma necessita de quantidades diferentes de elementos combustíveis.

- Angra 1: 121 elementos combustíveis, cada um deles contendo 235 varetas, 369 pastilhas por vareta, 4 m de comprimento, peso total de 600 kg;
- Angra 2: 193 elementos combustíveis, cada um deles contendo 236 varetas, 384 pastilhas por vareta, 5 m de comprimento, peso total de 840 kg.

Um Elemento Combustível permanece no reator durante três ciclos, ou seja, por aproximadamente três anos. Após este período, eles são armazenados dentro das usinas, nas piscinas de combustíveis usados.

O aquecimento do mercado nuclear e o fechamento de fábricas de fornecedores, tal como as da Alemanha, faz com que a nacionalização dos componentes metálicos do Elemento Combustível (EC) seja um interesse estratégico para o País. Tal iniciativa possibilitará a substituição de importações e a redução de custos e permitirá a exportação de produtos de alto valor agregado. Permitirá, também, menores custos de operação do usuário final (no Brasil, a Eletronuclear), evitando desligamentos prematuros das Usinas Nucleares de Angra 1, 2 e 3, e, principalmente, proporcionando maior segurança. Capacitará, ainda, o setor privado (em especial o metalúrgico) no desenvolvimento de matérias-primas para o atendimento de setores que utilizam materiais especiais.

De acordo com a IAEA e, dentre outros, com o estudo do Massachusetts Institute of Technology (MIT), no horizonte do presente estudo, há uma tendência de projetos de combustíveis nucleares com maiores enriquecimentos e maiores teores de venenos queimáveis, com os objetivos de reduzir a taxa de descarga dos combustíveis queimados, aumentar os fatores de disponibilidade das centrais nucleares e ampliar a utilização da energia do combustível nuclear. Desenvolver P&D no aumento da eficiência de venenos queimáveis é a chave para obter e nacionalizar combustíveis de alto desempenho.

41 O número 16 significa que são 16 varetas em cada lado; e NGF é new generation.



Com base na experiência de nacionalização de componentes de combustíveis de Geração II, no longo prazo, as empresas do setor deverão avaliar também a conveniência de investir em P&D para a nacionalização de componentes de combustíveis de geração III/III+. Da mesma forma, com base na experiência em desenvolvimento de combustíveis avançados de Geração II, deverá ser avaliada a aplicabilidade deste procedimento para combustíveis da nova geração de usinas nucleares brasileiras.

A Eletronuclear tem como missão estatutária o projeto, a construção e a operação de usinas nucleoeletricas, cujas responsabilidades incluem a guarda segura dos materiais radioativos gerados em suas instalações, protegendo os trabalhadores, o público e o meio ambiente dos efeitos nocivos da radiação, até a sua disposição final em instalações projetadas para o armazenamento de longo prazo ou definitivo, cuja responsabilidade legal de implantação e operação é da Comissão Nacional de Energia Nuclear (Cnen). A P&D nesta área é relevante para otimizar volumes e custos associados à gestão dos rejeitos gerados.

O descomissionamento de uma usina nuclear é uma fase pós-operacional normal e necessária, que pode ser entendida como um conjunto de medidas tomadas para retirar de serviço, com segurança, uma instalação nuclear, incluindo dependências, terreno, edifícios e equipamento, reduzindo a radioatividade residual a níveis que permitam liberar o local para uso restrito ou irrestrito. A P&D para desenvolver processos que mitiguem os custos de desmantelamento é uma atividade contínua e que deve acompanhar o período operacional e pós-operacional da usina.

10.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática energia nuclear foi caracterizado em resposta a um conjunto de métricas (ver Anexo) que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo, levando-se em conta o período até 2050.

No que diz respeito às métricas relacionadas à evolução tecnológica, foram considerados:

- Reatores de geração II: considera estudo e desenvolvimentos tecnológicos com foco na extensão da vida útil desses equipamentos. Em um contexto macro, espera-se que essas ações sejam contínuas, considerando-se o horizonte temporal de 2050. A vida útil desses equipamentos era estimada em 40 anos, porém muitos estão tendo seu período de

operação prolongado em 20 anos, além do aumento de potência da usina, obtido com a substituição de equipamentos de melhor eficiência térmica e elétrica, e da modernização na instrumentação e no controle.

- Reatores de geração III/III+: diz respeito à propagação dessa tecnologia ao longo do período considerado. Espera-se que a aplicação seja contínua ao longo dos anos, com foco na substituição aos reatores de geração II. Esta métrica é justificada, uma vez que a maior parte do crescimento previsto da capacidade nuclear no mundo para as próximas décadas virá com a implantação de reatores avançados de Geração III, majoritariamente do tipo PWR e BWR, e o cenário deverá ser também a tônica para o setor nuclear nacional. São uma evolução da Geração II, com segurança reforçada e vida útil de 60 anos, que pode ainda ser estendida.
- Reatores de geração IV: os Sistemas de Geração IV que estão em desenvolvimento têm como missão produzir melhorias inovadoras na economia, tendo custo competitivo em diferentes mercados e em concorrência com outras tecnologias, buscando novos avanços na segurança, na resistência à proliferação de armas nucleares e na proteção física. Estes sistemas podem operar em um ciclo de combustível aberto ou fechado, mas devem proporcionar uma redução no volume e na massa dos rejeitos de alta atividade gerados na operação dos reatores nucleares. O início da implantação de reatores de Geração IV não está previsto para antes de 2030. Por muitas décadas depois disso, os reatores de Geração IV provavelmente serão implantados ao lado de reatores de Geração III+, mas em números muito menores. Neste contexto, a métrica refere-se à previsão de desenvolvimento dessa tecnologia no Brasil. No contexto macro, espera-se para 2050 a incorporação de *feedback* da operação de um protótipo para reunir conteúdo para o desenvolvimento de tecnologia nacional.
- Fusão nuclear: a fusão nuclear oferece a possibilidade de gerar eletricidade de base praticamente sem a emissão de CO₂, com uma oferta quase ilimitada de combustível (deutério e trítio, isótopos de hidrogênio). No entanto, a estrada para as usinas de fusão nuclear é um longo caminho que ainda requer grandes esforços internacionais de P&D. De acordo com o roteiro recentemente publicado sobre energia de fusão (EFDA, 2012), nenhum reator de fusão industrial está previsto antes da segunda metade do século XXI. Esta métrica, portanto, apresenta uma estimativa do desenvolvimento de uma unidade modelo para demonstração. Considerando-se o cenário nacional, até 2050 estima-se a chegada de uma unidade demonstrativa para estudos.
- Ciclo do combustível: o Brasil possui reservas consideráveis e domínio das tecnologias do ciclo, faz sentido ampliar seu grau de autonomia, complementando a capacidade instalada nas várias etapas do ciclo e promovendo a nacionalização de itens estratégicos. Neste sentido, a respectiva métrica apresenta uma evolução da exploração do combustível nuclear no Brasil que, no contexto da macrotemática, deve ser contínuo no período considerado (2050).



- Decomissionamento: caso as usinas Angra 1 e Angra 2 sigam a tendência mundial de extensão de vida prevista para as usinas de Geração II, a avaliação das tecnologias para o desmantelamento deverá ocorrer na década final deste estudo. O Brasil deverá se beneficiar do grande desenvolvimento das tecnologias, notadamente as de robótica, e das lições aprendidas nas dezenas de desmantelamentos que ocorrerão no período. Neste contexto, a métrica informa sobre a necessidade do acompanhamento da evolução do conhecimento relativo ao tema, com foco em desenvolver as tecnologias que lhe são pertinentes no Brasil. No contexto da macrotemática, essa ação deve ser contínua, no período considerado.
- Rejeitos de baixo e médio nível de atividade: o Brasil desenvolve o projeto do repositório de rejeitos de baixo e médio nível, denominado de projeto RBMN. Este projeto tem por finalidade construir um repositório para dar destino a esses materiais pelo tempo necessário até que a sua intensidade radioativa atinja o nível de isenção estabelecido pelas normas internacionais e da Cnen. Esta métrica, portanto, informa sobre a previsão da construção de repositórios de rejeitos ao longo do período considerado. No contexto da macrotemática, essa ação deve ser contínua.
- Combustíveis usados: o Brasil não possui ainda projeto para a disposição final desses combustíveis. No âmbito da OEDC, os governos que ainda não concluíram as suas estratégias para a gestão dos rejeitos nucleares de alto nível são exortados a fazê-lo sem demora. Para rejeitos de alto nível, a disposição geológica profunda (*deep geological disposal*) é a solução recomendada. Considerando-se este cenário, a métrica apresenta a previsão para a aplicação de estratégias para a gestão dos combustíveis usados. No contexto da macrotemática, essa ação deve ser contínua no período considerado.
- Integração das térmicas nucleares e geradoras de energias renováveis: em termos de funcionamento, a produção de energia de base é a maneira mais eficiente para operar uma central nuclear. Grandes quantidades de produção variável de eletricidade renovável exigirão mais usinas térmicas para lidar com o *backup* do sistema e oferecer flexibilidade. Assim, é preciso que haja uma melhor integração das térmicas nucleares e dos geradoras de energia renovável, para evitar a perda de produção e melhorar a eficiência de custos, levando em consideração as peculiaridades de cada tecnologia. Neste contexto, a métrica apresenta a previsão para o desenvolvimento ou o aprimoramento de modelos de despacho e SmartGrids. Essa ação deve ser contínua ao longo do período considerado.

As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado foram apresentadas na planilha de indicadores, conforme instruções constantes na própria planilha.

No âmbito da estratégia setorial, as métricas foram construídas considerando-se as seguintes dimensões de análise:

- Ambiental e social;
- Regulação;
- Política, governança e incentivos;
- Cultura e/ou outros fatores externos (não tecnológicos);
- Plano decenal (médio prazo);
- Plano nacional (longo prazo).

Sobre a questão socioambiental, foram consideradas as seguintes dimensões de análise:

- Aspectos ambientais globais;
- Aspectos ambientais locais;
- Aspectos sociais e culturais.

Para a construção das métricas da produção de CT&I foram considerados os seguintes assuntos:

- Produção científica em âmbito internacional;
- Produção científica em âmbito nacional;
- Produção de patentes e projetos em âmbito internacional;
- Produção de patentes e projetos em âmbito nacional.

No contexto da estrutura de CT&I, as métricas consideraram os seguintes temas:

- Recursos humanos no Brasil;
- Infraestrutura de CT&I no Brasil;
- Rede colaborativa.

E, por fim, as métricas de indústria e mercado trabalharam os seguintes temas:

- Percepção sobre a demanda no mercado nacional;
- Percepção sobre a demanda no mercado global;
- Cadeia produtiva.
-



10.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associadas aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta: i) as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas; e ii) os fatores portadores de futuro que suportam esta evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

10.3.1. Temática tecnologias de reatores

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática (ver Gráfico 83 e Gráfico 84).

Rota - Reatores de geração II

Conforme citado, os reatores de água leve pressurizada alcançaram o mais alto grau de maturidade, que é aplicável ao projeto; construção; desempenho; fornecimento de materiais, combustíveis e componentes; operações; serviço e regulação. Não existe nível de maturidade equivalente com qualquer outra tecnologia de reator nuclear. Entretanto, este grau de maturidade é aplicável em nível global. Localmente, Angra 1, Angra 2 e Angra 3 são usinas de Geração II e devem ser submetidas à extensão de vida, para 60 anos ou mais. Para as condições atuais, possuem maturidade completa, mas, tendo em vista os ajustes para a extensão de vida dos reatores, os Technology Readiness Levels 8 (TRL8) e os TRL9 estão sendo deslocados para 2050.

Rota - Reatores de geração III

Os reatores de Geração III, que devem compor a nova geração de usinas nucleares brasileiras, já estão em operação no mundo. Está sendo assumida para a elaboração deste documento a diretriz tecnológica de aquisição no mercado internacional de reatores já testados e validados. Portanto, o TRL para a tecnologia que venha a ser escolhida está sendo considerado como um TRL7 em nível internacional atual, pois alguns desses reatores são do tipo Foak e terão *feedback* operacional consistente por volta de 2025. O TRL8, para o caso do Brasil, está sendo colocado para 2040, a fim de contemplar a necessidade de familiarização por parte dos operadores e dos reguladores; e o TRL9 para 2050, considerando-se que vai haver *feedback* operacional de uma usina desse tipo em operação no Brasil.

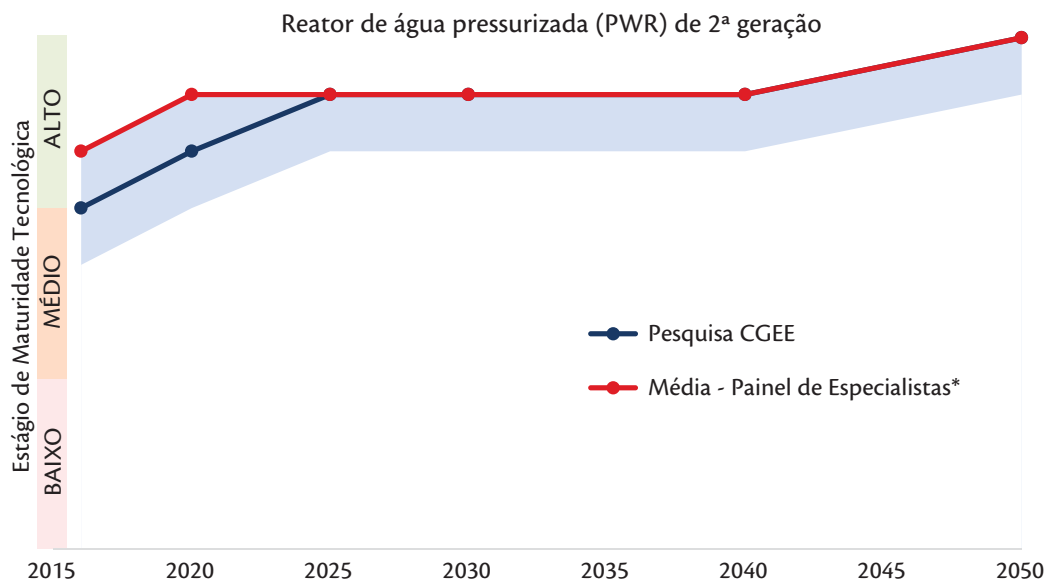


Gráfico 83 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Reator de Água Pressurizada (PWR) de Segunda Geração

Fonte: Elaboração própria.

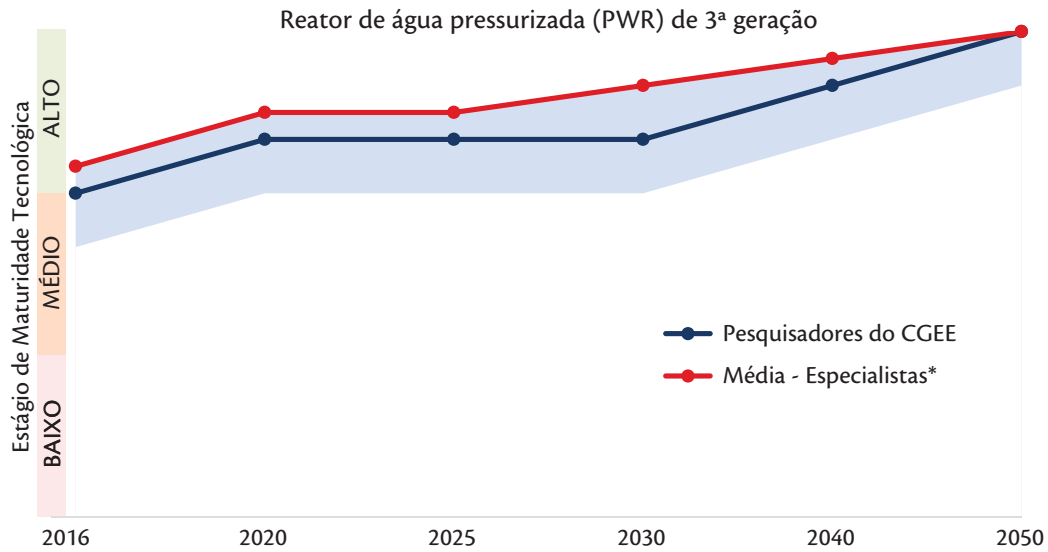


Gráfico 84 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Reator de Água Pressurizada (PWR) de Terceira Geração

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Reator de Água Pressurizada (PWR) de Segunda e Terceira Gerações

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Tecnologias de reatores	PWR geração II	Fatores portadores de futuro	Estudos de extensão de vida de para 60 anos ou mais é meta do setor mundial	Estudos e implementação de ajustes para extensão de vida	Outorga CNEN para extensão de vida para 2040	Outorga CNEN extensão de vida para 2050	Implementação das tecnologias de extensão da vida útil e testes iniciais	Homologação das tecnologias. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	MÉDIO	ALTO				
	PWR geração III	Fatores portadores de futuro	Elaboração do BUR	Escolha da tecnologia para nova geração de usinas e aperfeiçoamento do BUR	Implementação de processo para os locais de usinas de nova geração	Escolha de local e contratação usinas	2 GW adicionais de usinas de 3a geração	4 GW adicionais de usinas de 3a geração. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	MÉDIO	ALTO				

Fonte: Elaboração própria.



10.3.2. Temática ciclo do combustível nuclear

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática (ver Gráfico 85 e Gráfico 86).

Rota - Elemento combustível de geração II

A INB fabrica os Elementos Combustíveis de Geração II para as usinas de Angra 1 (modelo 16NGF - projeto *Westinghouse*) e de Angra 2 (modelo HTP - projeto Siemens), que são de diferentes tecnologias. A INB possui domínio completo das ferramentas de projeto e fabricação, sob licença dos fabricantes. Tem limitação na qualificação de novos projetos, notadamente, no desempenho sob irradiação, o que explicita a importância do RMB para o Brasil. Para efeito deste estudo, o TRL está sendo considerado o mesmo do fornecedor, exceto os TRL7, TRL8 e TRL9, para contemplar o desenvolvimento nacional para a substituição de insumos, componentes e peças. Ademais, são consideradas a P&D das tecnologias de gerenciamento, processamento e armazenamento de combustíveis usados, no *roadmap* dessa rota.

Rota - Elemento combustível de geração III

Os reatores de Geração III, que devem compor a nova geração de usinas nucleares brasileiras já estão em operação no mundo. Está sendo assumida para a elaboração deste documento a diretriz tecnológica de aquisição no mercado internacional de reatores já testados e validados. O TRL para os elementos combustíveis está seguindo o mesmo critério usado para os reatores, ou seja, está sendo considerado o TRL7 pleno para 2025 e o TRL8 pleno para 2040, para contemplar a necessidade de familiarização por parte dos operadores e dos reguladores, e o TRL9 para 2050, considerando-se que vai haver uma usina desse tipo em operação no Brasil e a INB terá uma linha de produção para o novo combustível. Ademais, são consideradas a P&D das tecnologias de gerenciamento, processamento e armazenamento de combustíveis usados, no *roadmap* dessa rota.

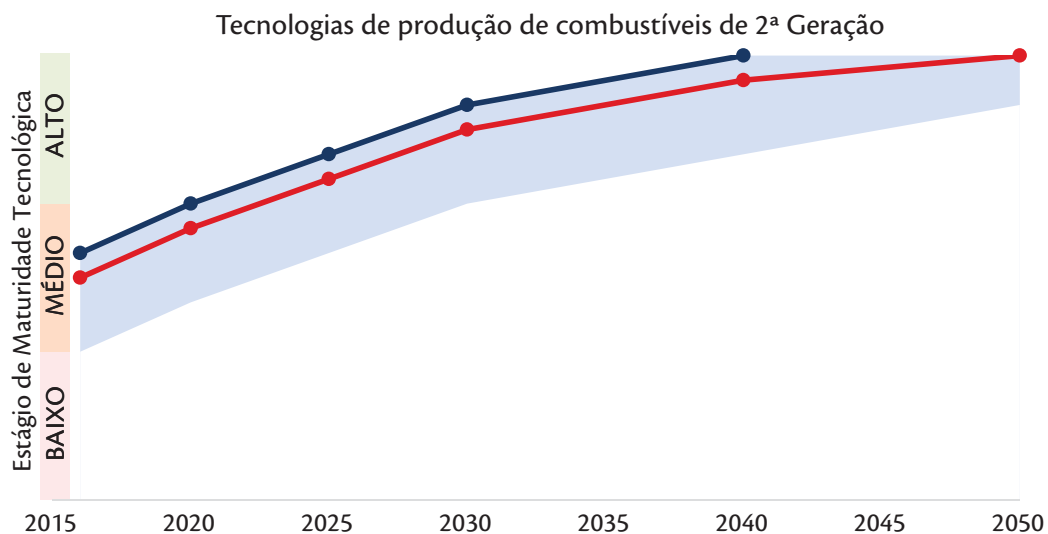


Gráfico 85 - Evolução da maturidade tecnológica da rota tecnologias de Produção de Combustíveis de Segunda Geração

Fonte: Elaboração própria.

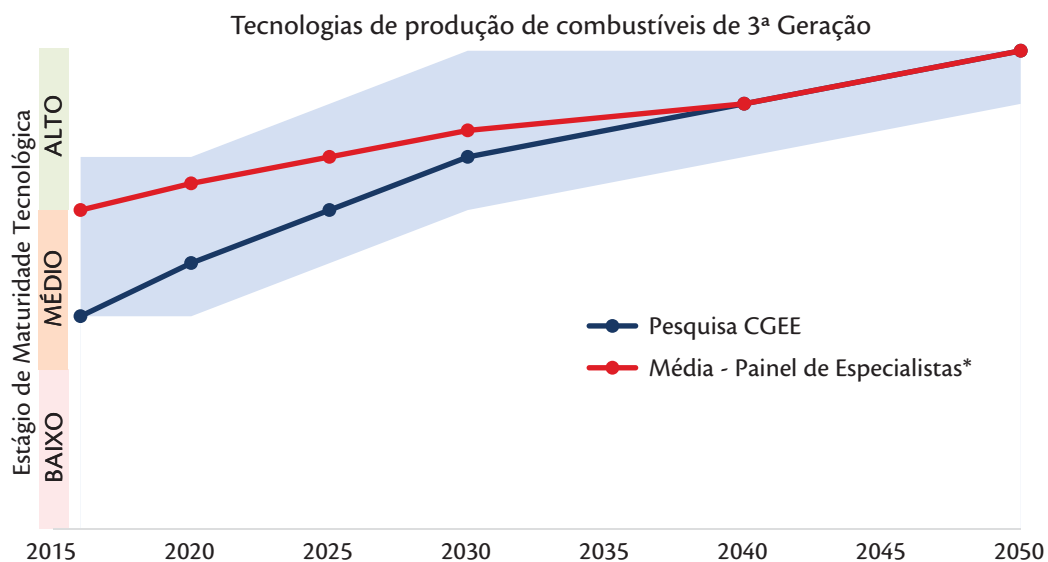


Gráfico 86 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Tecnologias de Produção de Combustíveis de Terceira Geração

Fonte: Elaboração própria.



Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 46.

Tabela 46 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnologias de Produção de Combustíveis de Segunda e Terceira Gerações

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Ciclo do combustível nuclear	Elemento combustível geração II	Fatores portadores de futuro	Avaliação da conveniência de implantação de capacidade industrial no Brasil	Avaliação da conveniência de implantação de capacidade industrial no Brasil, nacionalização dos componentes metálicos do Elemento Combustível (EC) dos elementos existentes e em uso e aprimoramento do desempenho ultracentrifugas	Testes dos componentes metálicos e homologação	Implantação dos componentes	Programa de O&M e monitoramento consolidados	Programa de operação reestabelecido. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			
	Elemento combustível geração III	Fatores portadores de futuro	Avaliação da conveniência de implantação de capacidade industrial no Brasil	Repotenciação da cadeia de combustíveis no Brasil	Garantia de produção e manutenção de fornecimento de elementos metálicos e combustível	Avaliação da conveniência de implantação de capacidade industrial no Brasil, nacionalização dos componentes metálicos do Elemento Combustível (EC) dos elementos existentes e em uso e aprimoramento do desempenho ultracentrifugas	Testes dos componentes metálicos e homologação, Implantação dos componentes	Programa de O&M e monitoramento consolidados, Programa de operação reestabelecido. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

10.3.3. Temática descomissionamento

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade da rota tecnológica desta temática (ver Gráfico 87).

Rota - Tecnologias de descomissionamento de usinas

Para contemplar a P&D para a modificação de processos para a mitigação de custos futuros de descomissionamento das usinas brasileiras, o TRL8 está sendo deslocado para 2025. Para contemplar a contínua evolução tecnológica internacional, notadamente pelo crescimento da utilização de robôs e de sistemas automatizados na busca contínua de maior eficiência e redução de exposição de operadores à radiação, o TRL9 está sendo deslocado para 2050. Ademais, são consideradas a P&D das tecnologias de gerenciamento, processamento e armazenamento de rejeitos de baixo e médio níveis de radiação, no *roadmap* dessa rota.

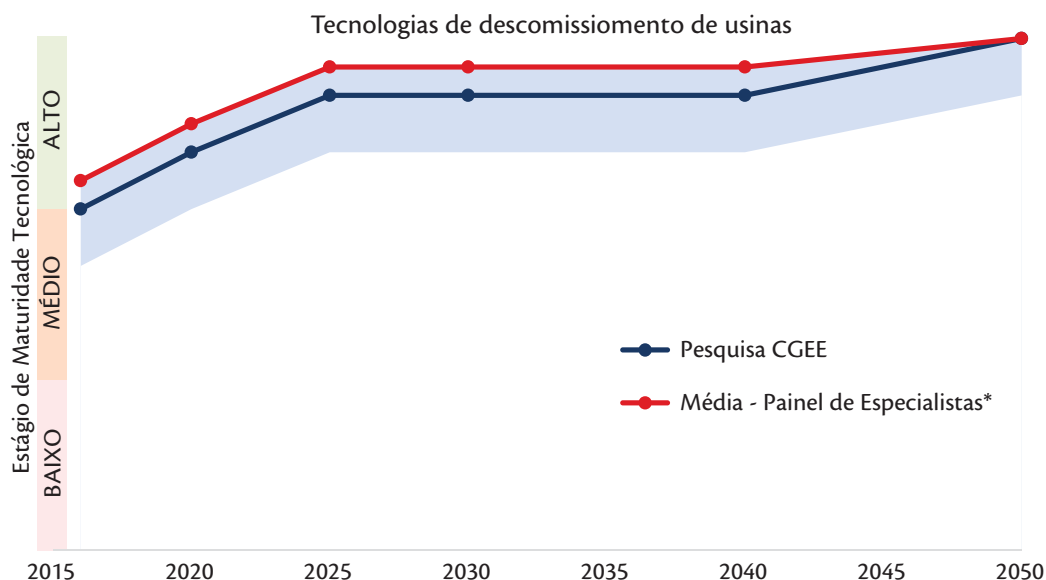


Gráfico 87 - Evolução da maturidade tecnológica da rota tecnologias de Descomissionamento de Usinas

Fonte: Elaboração própria.



Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 47.

Tabela 47 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnologias de descomissionamento de usinas

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Descomissionamento	Tecnologias de descomissionamento	Fatores portadores de futuro	Acompanha- mento da evolução do conhecimen- to relativo ao tema e ma- nutenção do cálculo do fundo de pro- visionamento atualizado para Angra 1 e Angra 2.	Construir fundo de provisio- namento e seleção das tecnologias de descomis- sionamento de Angra 3	Elaborados os planos de descomisso- namentos de Angra 1 e 2	Elaborados os planos de descomisso- namentos de Angra 3	Repotenciar os sistemas de condicio- namento do material des- cartado das usinas	Fundo de provisio- namento, plano de descomis- sionamento e tecnologias para o acondi- cionamento do rejeito das usinas Angra 1, 2 e 3 consolidados. Base técnica e de fomento ativos para o desen- volvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.
		Maturidade	MÉDIO	ALTO				

Fonte: Elaboração própria.

10.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro.

Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas conforme apresentado na Tabela 48.

Tabela 48 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	PWR Geração II	Combustíveis
2	Elemento combustível II	Descomissionamento
3	Descomissionamento	Sistemas
4	PWR Geração III	Sistemas
5	Elemento combustível III	Combustíveis

Fonte: Elaboração própria.

No que diz respeito à rota PWR Geração II, sem considerar a extensão de vida, os prazos operacionais planejados para Angra 1 seria 2024; Angra 2, 2040; e Angra 3, 2050. No horizonte deste estudo, ações de CT&I são necessárias para atingir condições de extensão de vida da usina Angra 1 por, pelo menos, 20 anos após 2024; e de Angra 2, por pelo menos 20 anos após 2040. Estas ações vão permitir a manutenção de 640 MW (Angra 1) e de 1350 MW (Angra2) de energia firme no SIN, livre de emissão de gases de efeito estufa, otimizando o investimento realizado pelo País.

Adicionalmente, as ações de CT&I para a nacionalização de equipamentos, a modernização da instrumentação e o controle e a segurança cibernética (ataque *hackers*), entre outros, são necessárias para aumentar o fator de capacidade das usinas: reduzir os tempos de parada e operar continuamente à potência máxima.



Elemento combustível II: havia dúvida quanto ao fornecimento de itens provenientes de fornecedores alemães, devido ao encerramento das atividades nucleares naquele país (2022). Mais recentemente, no entanto, potenciais acordos da INB com a Coreia e a China têm contribuído para mitigar essas incertezas. Ações de CT&I para a nacionalização dos componentes metálicos do Elemento Combustível (EC) dos elementos existentes e em uso poderão contribuir para melhorar a inserção da INB como fornecedora internacional no mercado de combustíveis e alcançar autonomia total.

Outro tema que demanda ações de CT&I são os combustíveis de alto desempenho para aumentar o aproveitamento da energia contida nos Elementos Combustíveis e elevar o tempo de operação entre paradas para reabastecimento, e com isto aumentar a competitividade da opção nuclear em comparação com outras fontes de geração. Além disso, são destaques as oportunidades do desenvolvimento nacional de tecnologias de gerenciamento, processamento e armazenamento de combustíveis usados.

Descomissionamento: as atividades de descomissionamento de uma usina nuclear se iniciam com a entrada em operação da usina e com os estudos financeiros e de engenharia para a constituição do fundo que pagará as atividades de desmantelamento da usina ao final da vida. A formação do fundo é feita por meio de parcela embutida na tarifa cobrada na geração de eletricidade. Ao longo dos anos, com a evolução das tecnologias de desmantelamento e a evolução da legislação e de normas regulatórias, grupos de estudo permanentes são necessários para avaliar os fundamentos da constituição do fundo de descomissionamento, e para selecionar ou adequar processos, requisitos e tecnologias para o descomissionamento das usinas brasileiras. Entre 2040-2050, mesmo considerando-se a extensão de vida da Angra 1, é provável que ocorra o encerramento das atividades dessa usina e se intensifiquem as atividades de desmantelamento. Ações de CT&I, de longo prazo, são necessárias para apoiar essas atividades. Ainda, nesse contexto, são necessários desenvolver tecnologias de tratamento e armazenamento dos rejeitos radioativos, oriundos das usinas.

PWR Geração III: com a crescente necessidade de usinas termoeletricas prevista a partir do quinquênio 2025/2030, e pelo fato de existir um portfólio de oito fornecedores com diferentes propostas de usinas PWR de Geração III/III+ disponíveis no mercado, ações de CT&I são necessárias para aprimorar ou adequar processos, requisitos e tecnologias para selecionar uma nova geração de usinas que melhor atenda às necessidades do SIN e aproveite de forma vantajosa a infraestrutura existente no País, além da escolher o local adequado para esses empreendimentos, considerando-se os critérios:

- Fatores de saúde, segurança e proteção;
- Sismicidade do local e vulnerabilidade a catástrofes naturais extremas ou provocadas pelo homem;

- Fatores de engenharia e custo (por exemplo, disponibilidade de água de resfriamento, infraestrutura eléctrica, distância dos centros de carga);
- Fatores socioeconômicos;
- Considerações ambientais.

Elemento Combustível Geração III: uma vez que o Brasil tenha escolhido a tecnologia da usina de Geração III/III+ que comporá a nova frota de usinas a ser instalada no País, é razoável supor que será criada uma infraestrutura para a fabricação dos Elementos Combustíveis dessas usinas, aproveitando a expertise da INB. Em um primeiro momento, supõe-se que a fabricação dos Elementos Combustíveis de Geração III/III+ se dará por meio de licenciamento da tecnologia por parte do fornecedor da usina de Geração III/III+. Em um momento seguinte, é também razoável se supor que o Brasil buscará a nacionalização de itens e componentes, seguindo a mesma metodologia aplicada aos Elementos Combustíveis de Geração II.

A exemplo dos Elementos Combustíveis de Geração II, é razoável supor que ações de CT&I venham a ser empreendidas para obter combustíveis de alto desempenho de Geração III.



Capítulo 11



Capítulo 11

Macrotemática Armazenamento de Energia

As tecnologias de armazenamento de energia permitirão uma maior eficiência operativa dos sistemas elétricos, maior confiabilidade e qualidade no fornecimento da energia, resiliência, integração de fontes renováveis intermitentes e aumento do nível de cogeração (produção de eletricidade e calor) e deverão desempenhar um papel importante na descarbonização do sistema energético por meio de:

- melhor eficiência do uso dos recursos do sistema elétrico;
- integração de fontes renováveis intermitentes;
- viabilização da geração distribuída e do consumidor *off-grid*;
- suporte à maior produção de energia onde é consumida;
- maior acesso à energia;
- maior estabilidade, flexibilidade, confiabilidade e resiliência da rede elétrica.

Embora algumas tecnologias de armazenamento de energia estejam maduras ou próximas da maturidade, a maior parte delas ainda está nos estágios iniciais de desenvolvimento. Atualmente, ainda apresentam custos elevados e demandarão investimentos em pesquisa e desenvolvimento para que seu potencial possa ser plenamente realizado.

Um estudo prospectivo sobre a inserção (tanto do lado da cadeia produtiva, quanto do setor elétrico) e sobre o futuro dos Sistemas de Armazenamento de Energia (SAE) no SEB deve buscar respostas para as seguintes perguntas:

- qual é o papel do armazenamento de energia no sistema energético de hoje e de amanhã?
- por que o armazenamento torna-se mais importante para a política energética?
- quais problemas do Sistema Elétrico de Potência poderiam ser solucionados com SAE?
- quais são as tecnologias mais adequadas à solução de cada problema?
- em que nível das redes de eletricidade o armazenamento deve ser integrado?
- qual é o grau de maturidade tecnológica e comercial de cada tecnologia no mundo? E no Brasil?

- quem detém a tecnologia?
- quem pode desenvolver a tecnologia?
- quanto tempo e investimento serão necessários?
- como torná-la viável sob os aspectos técnicos e comerciais?
- quais são os obstáculos ao desenvolvimento e à implantação?
- por que razão se trata de uma questão importante para o Brasil?
- como poderia o quadro regulatório ser adaptado para integrar melhor o armazenamento?
- qual é a importância e o estágio atual da cadeia de suprimentos?
- o que a P&D no Brasil pode fazer para permitir o desenvolvimento e a implantação de SAE em todos os níveis a curto e a médio prazos?

Assim, neste documento, foi considerada a estrutura apresentada na Figura 21 sobre a qual serão direcionadas as considerações feitas neste trabalho.

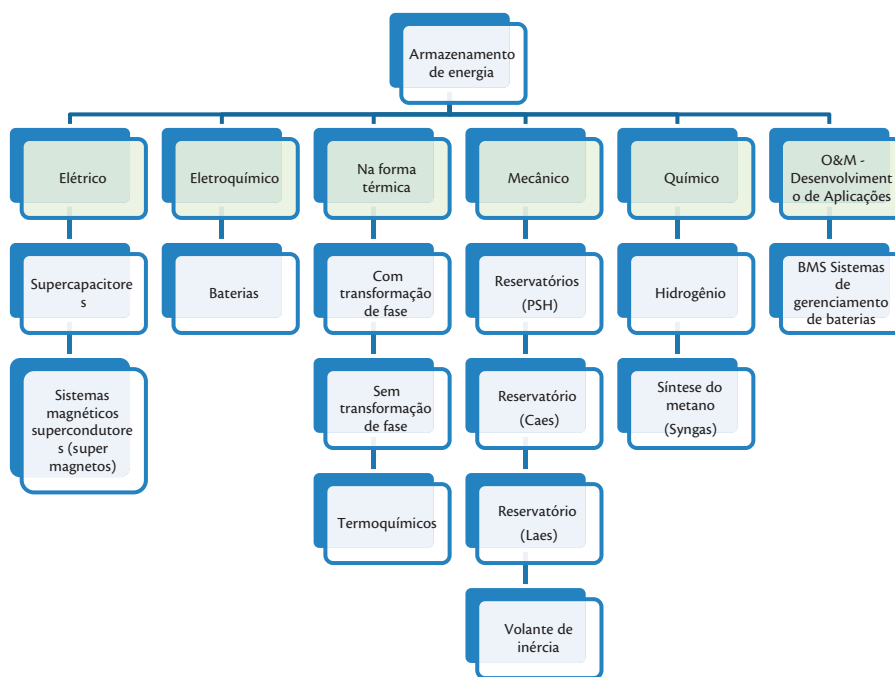


Figura 21 - Caracterização da macrotemática armazenamento de energia (preenchimento na cor verde, temáticas; abaixo, rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.



11.1. Visão de futuro

11.1.1. Cenário setorial

Há, no mundo, inúmeras tecnologias de armazenamento disponíveis, em diversos estágios de desenvolvimento, desde pesquisa até aplicações comerciais. Os projetos atualmente em operação aproximam-se de 200 GW. É um número pequeno se comparado à capacidade de produção de energia elétrica no mundo. Entretanto, é cerca de 35% de toda a capacidade instalada brasileira.

Estudos conduzidos pela EPE indicam que, em 2030, até 10% de toda a demanda por energia elétrica no Brasil seja suprida por GD. E estudos conduzidos pela *Bloomberg (Energy Outlook)* indicam que em 25 anos (a partir de 2014) a produção de energia elétrica por fontes renováveis no mundo deverá superar a produção das fontes convencionais (fóssil e nuclear). Como as fontes renováveis não dispõem de armazenamento (a quantidade de geração de energia depende essencialmente das condições instantâneas de vento ou da incidência de radiação solar), as tecnologias de armazenamento serão condição necessária para a integração dessas fontes de forma segura aos sistemas de potência em operação. Neste cenário, Tecnologias de Armazenamento de Energia apresentam-se como solução viável para os problemas acima relacionados.

Especialistas em Armazenamento de Energia reunidos pelo CGEE avaliaram o cenário desenhado e apresentaram os objetivos geral e específicos em relação ao desenvolvimento de estudos e de pesquisas relacionados ao tema.

11.1.2. Objetivo geral

Desenvolver soluções e incentivar o desenvolvimento da tecnologia nacional de sistemas de Armazenamento de Energia de grande porte, capazes de mitigar a intermitência das fontes que apresentem esta característica (eólica e solar fotovoltaica de grande porte),⁴² buscando elevar a segurança da inserção dessa fonte no SIN.

⁴² Entende-se por “Sistemas de Grande Porte” aqueles conectados diretamente ao Sistema Elétrico de Potência, independentemente de uma unidade consumidora (por oposição à Geração Distribuída). Assim, considerando-se a definição da REN Aneel 687, este estudo terá como “Sistemas de Grande Porte” aqueles com potência instalada maior que 5 MW pico.

Desenvolver tecnologia nacional para Sistemas de Armazenamento de Energia capazes de mitigar a intermitência da GD (majoritariamente solar fotovoltaica), buscando elevar a sua confiabilidade, segurança e modularidade, e, ainda, reduzindo o custo dos Sistemas de Armazenamento de Energia distribuídos (médio e pequeno portes).⁴³

Desenvolver tecnologia nacional para Sistemas de Armazenamento de Energia capazes de viabilizar o desenvolvimento e a implantação de microrredes, buscando elevar a confiabilidade e a segurança operativa das redes de distribuição, e assegurando confiabilidade, modularidade e redução de custo dos Sistemas de Armazenamento de Energia distribuídos (médio e pequeno portes).

11.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes, que incluem:

Curto Prazo (2017-2020)

- Desenvolver métodos e padrões para a análise de impactos da aplicação da tecnologia sobre a gestão e a operação do sistema elétrico de potência;
- Desenvolver tecnologias de gestão e controle da operação para sistemas hídricos (bombeamento reversível);
- Metodologias, modelos e ferramentas para a seleção e a priorização das tecnologias de armazenamento para a aplicação no sistema nacional (incluindo as usinas de reservatório);
- Metodologias, modelos e ferramentas para a seleção e a priorização das tecnologias de armazenamento para a aplicação nas instalações de geração (incluindo as usinas de reservatório).

⁴³ Entende-se por “Sistemas de Médio e Pequeno Portes” aqueles conectados ao Sistema Elétrico de Potência através de uma unidade consumidora (conforme definido na REN Aneel 687 na modalidade de Geração Distribuída). Assim, considerando-se a definição da REN Aneel 687, este estudo considerará “Sistemas de Médio e Pequeno Portes” aqueles com potência instalada menor ou igual a 5 MW pico.



Médio Prazo (2020-2030)

- Desenvolver tecnologias de gestão da operação, controle e manutenção de sistemas de armazenamento distribuídos (de pequeno e médio porte);
- Desenvolver tecnologias de logística (tanto de distribuição quanto de logística reversa), implantação de sistemas de reciclagem e descarte, especialmente de baterias;
- Desenvolver tecnologias de integração (supervisão e controle) de sistemas de armazenamento com plantas de característica intermitente, como as eólicas e as solares de grande porte, e sistemas de supervisão e controle da operação da Geração e Transmissão;
- Desenvolver componentes capazes de armazenar energia (notadamente baterias e supercapacitores) para suportar a ampla aplicação esperada para os sistemas de armazenamento.

Longo Prazo (2030-2050)

- Desenvolver ou aprimorar tecnologias de armazenamento mecânico e térmico para atender às demandas dos respectivos sistemas de geração, considerando-se a viabilidade econômica da sua aplicação.

11.1.4. Fundamentação

Na macrotecânica armazenamento de energia foram identificadas as temáticas (formas de armazenamento) e respectivas rotas mais promissoras, conforme apresentado na Figura 21.

As rotas de natureza elétrica podem ser utilizadas com sistemas de geração de pequeno a grande porte, já que baterias, por exemplo, possuem a qualidade do empilhamento (modularidade). No caso da rota tecnológica Mecânicos, a tecnologia mais promissora é a de armazenamento hídrico. Neste contexto, o acúmulo de energia pode alcançar patamares gigantescos, capazes de suprir o déficit de energia elétrica por horas, ou dias, na falta de uma grande usina hidroelétrica, por exemplo.

O foco pelo uso dos reservatórios hídricos é mais plausível do que para qualquer outro meio de armazenamento, dada a vasta experiência com o uso desses sistemas e, principalmente, pela favorável condição territorial e de oferta de água.

Ainda que os princípios do Armazenamento de Energia sejam conhecidos há bastante tempo, o desenvolvimento e a aplicação de SAE em larga escala são relativamente novos, mesmo no mundo,

uma vez que há a necessidade de uma séria de tecnologias novas associadas aos sistemas de armazenamento. A partir das necessidades de adaptação dos respectivos sistemas à futura matriz elétrica mundial, observa-se que os sistemas, embora consolidados no mercado, passam a merecer um nível de maturidade de baixo para médio.

Os sistemas eletrônicos e *softwares* de supervisão e controle de baterias, novos materiais que assegurem confiabilidade, durabilidade, segurança, e que minimizem impactos ambientais nos processos de fabricação, operação e descarte, são requisitos fundamentais para a integração de sistemas de armazenamento à respectiva matriz.

11.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática armazenamento de energia foi caracterizado em resposta a um conjunto de métricas que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo, levando-se em conta o período até 2050. Como fundamentação para as respectivas métricas, este documento chama a atenção para os seguintes pontos:

- Crescimento da demanda: a evolução da demanda de energia elétrica em 2050 deve significar algo em torno de 400 GW e 480 GW em capacidade instalada; a UHE continuará sendo a principal forma de expansão de geração elétrica, devendo atingir o limite de 172 GW hoje inventariado entre 2030 e 2040;
- Usinas com reservatórios terão a sua importância aumentada, tanto para a maximização da produção hidroelétrica, quanto para a produção eólica e solar;
- Usinas reversíveis, por sua flexibilidade operativa, também deverão ter sua importância aumentada, contribuindo nos aspectos de eficiência e segurança operativas e na integração de fontes renováveis intermitentes.

A fonte eólica, com potencial estimado de 340 GW, continuará se desenvolvendo junto com o crescimento de grandes centrais fotovoltaicas, das quais se espera um aumento de eficiência e a redução de custo. Segundo a EPE, o crescimento projetado até 2025, ou 2030, será impulsionado pela maior participação de fontes renováveis.



A exploração do potencial solar na rota heliotérmica será marginal. O planejamento setorial não prevê o desenvolvimento de grandes centrais heliotérmicas, em função da ainda baixa competitividade da fonte.

- **GD:** espera-se um crescimento de GD principalmente na zona urbana, com expansão até 2030, podendo chegar a 10% do mercado de energia em 2030. O desenvolvimento da GD irá se fortalecer em todos os segmentos de consumo - industrial, comercial e residencial, com predominância da fonte solar fotovoltaica.
- **Redes elétricas inteligentes (REI):** a introdução das REI e a sua expansão serão importantes para o sistema elétrico nacional, o que será motivado pela GD e pela eficiência energética; embora com benefícios reconhecidos, a questão regulatória (especialmente o reconhecimento tarifário) e os novos modelos de negócio serão fundamentais para viabilizar financeiramente os investimentos esperados em REI.
- **Uso racional de energia:** as ações de eficiência energética serão crescentes ao longo das próximas décadas, até 2050, tornando-se tema de interesse perene. O Brasil assumiu o compromisso de reduzir a demanda por energia elétrica em 10%, com base no consumo de 2015 até 2030, por meio de ações de uso racional da energia.
- **Armazenamento de energia:** permeia todos os aspectos acima relacionados; em grande escala (SIN), o armazenamento terá importância crescente no horizonte até 2050, motivada e em compasso com a penetração crescente das fontes intermitentes e sazonais no SIN. Segundo a EPE, a sua expansão ocorrerá a taxas mais significativas na medida em que se esgotar a capacidade do parque gerador de mitigar a variabilidade das fontes intermitentes e otimizar a operação termoeletrica.

O armazenamento em pequena escala deverá ocorrer na distribuição, motivado e em compasso com a penetração da GD (notadamente solar fotovoltaica) e de veículos elétricos. A penetração das REIs e de microrredes exigirá a presença de sistemas de armazenamento de pequeno e médio portes distribuídos, e ainda que não seja possível precisar a tecnologia vinculada (por exemplo, baterias; reservatórios de acumulação e usinas reversíveis, células a combustível), vislumbra-se neste momento uma vantagem para as baterias, desde que cumpram os requisitos de baixo custo e manutenção, modularidade e escalabilidade, baixo impacto ambiental (descarte e/ou reciclagem baratos e seguros) e logística reversa bem estabelecida.

No contexto da evolução tecnológica, as métricas que subsidiarão o cenário da macrotecnica dizem respeito à/ao:

- **Eficiência/perdas (%)** - avaliar a eficiência global do sistema de armazenamento e a sua evolução ao longo do tempo. Devem ser consideradas todas as perdas (por autodescarga, no caso de baterias, e por evaporação e percolação, no caso de PSH com serviços de suporte e auxiliares, como no caso dos volantes de inércia etc.). Cada uma das rotas tecnológicas tem uma perda característica, associada à tecnologia adotada. Por exemplo, enquanto baterias apresentam perdas por autodescarga e aquecimento (durante o ciclos de carga e descarga), os volantes apresentam perdas por atrito e na infraestrutura de suporte associada. Já as usinas reversíveis apresentam perdas por evaporação e percolação, além da própria eficiência das bombas.
- **Densidade de energia (kW.h/m)** - avaliar a densidade de energia armazenada em unidade de energia por unidade de volume (ou peso); este parâmetro é especialmente importante no caso em que peso e volume sejam parâmetros importantes de especificação, como em veículos elétricos. Há um valor típico de densidade de energia característico de cada rota tecnológica; uma vez que a densidade de energia é especialmente importante quando se busca mobilidade, este parâmetro perde importância em aplicações estacionárias, onde se buscam eficiência, confiabilidade, disponibilidade e baixo custo.
- **Investimento (R\$/kW.h instalado)** - avaliar o custo de implantação por kW.h em capacidade de armazenamento. Também há valores típicos por rota tecnológica.
- **Custo de armazenamento (R\$/kW.h armazenado)** - avaliar o custo do sistema de armazenamento por kW.h armazenado, ou melhor, o valor de custo adicionado a cada unidade de energia armazenada. Idealmente, seria calculado com base no custo total de propriedade do SAE (todos os custos incorridos ao longo de sua vida útil, incluindo investimento inicial, custos de O&M, de perdas e de descomissionamento) dividido por toda a energia armazenada ao longo de sua vida útil. Como estes parâmetros, é difícil obter ou calcular, pode-se trabalhar com valores anualizados. Em termos técnico-econômicos, é o parâmetro de custo mais importante para a avaliação e a comparação de SAEs e o parâmetro mais importante quando se busca a comparação de diferentes tecnologias que possam atender igualmente ao objetivo desejado.
- **Disponibilidade (horas ou %)** - apresentar o tempo em que o SAE fica disponível para uso com plena funcionalidade. Usualmente medido em termos percentuais para um período anual.
- **Escalabilidade** - apresentar o aumento de capacidade instalada em um determinado *site* por meio da simples adição de módulos, sem a necessidade de reprojeter toda a instalação.
- **Padronização** - indicar como os SAEs de diferentes tecnologias podem ser avaliados e comparados entre si. No caso de fabricantes concorrentes em uma mesma rota tecnológica, é importante para a indústria permitir a comparação e a intercâmbio das partes, componentes e sistemas.



- **Nacionalização** - apresentar o grau de nacionalização de um dado sistema; pode ser medido em % do valor total ou mesmo em % do peso (kg), como adota o BNDES em algumas situações. É importante que se estabeleça o grau de nacionalização de forma estratégica, isto é, o “grau de nacionalização” não precisa, necessariamente, ser de 100%. Fatores como escala ou competitividade e dependência de importação devem ser considerados na definição das metas de nacionalização.
- **Segurança** - em todos os seus aspectos, incluindo a segurança de pessoas, de equipamentos e operativa do sistema elétrico.

As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado foram apresentadas no Anexo, conforme instruções constantes no próprio documento. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias, as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e setor elétrico brasileiro potencializam a melhoria ou a participação dessas questões no setor elétrico brasileiro, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

11.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associadas aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta: i) as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas; e ii) os fatores portadores de futuro que suportam essa evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

11.3.1. Temática armazenamento elétrico

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota – Supercapacitores

O desenvolvimento desta rota está atualmente associado ao desenvolvimento de materiais. Devem ser desenvolvidos materiais esponjosos para aumentar a área das placas do capacitor, além de nanomateriais capazes de possibilitar o desempenho desejado dessa tecnologia (ver Gráfico 88).

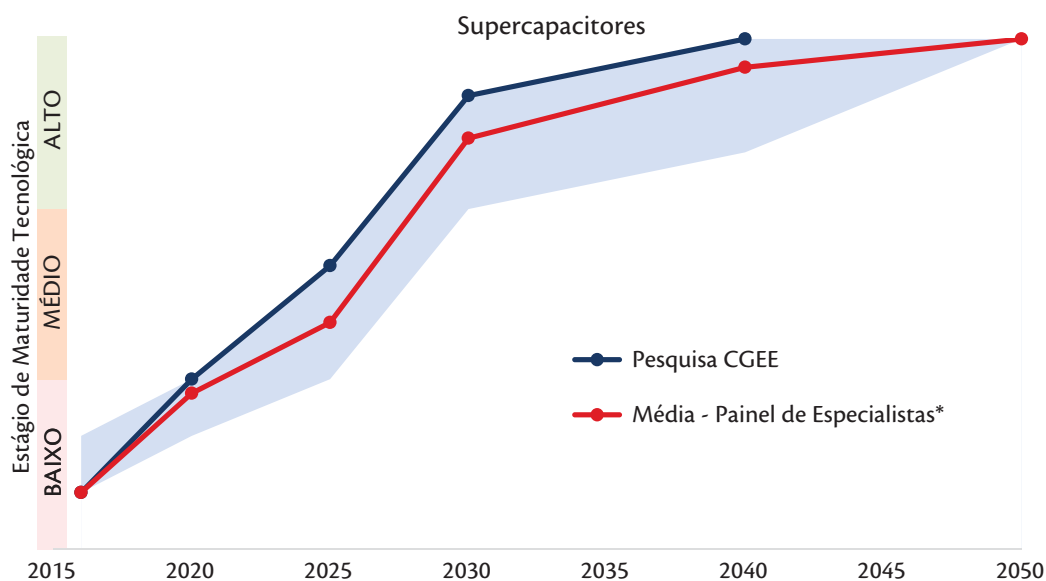


Gráfico 88 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Supercapacitores

Fonte: Elaboração própria.



Rota - Sistemas magnéticos supercondutores (super magnetos)

Armazenam energia em um campo magnético. Para manter o campo magnético é necessária uma corrente elétrica contínua circulante, que produza perdas ôhmicas proporcionais à resistência dos condutores e ao quadrado da corrente elétrica circulante, que, por sua vez, é diretamente proporcional à quantidade de energia armazenada. Por esta razão, sistemas magnéticos de armazenamento utilizam-se de supercondutores, com resistência ôhmica muito baixa, ou nula, eliminando as perdas ôhmicas.

A utilização de propriedades supercondutivas requer temperaturas muito baixas, da ordem de até 260 °C negativos, o que requer tecnologia e infraestrutura especiais para lidar com estas temperaturas, normalmente obtidas com hélio líquido. Desta forma, as instalações apresentam consumo de energia elevado mesmo quando em flutuação (*standby*), devido ao consumo dos sistemas de refrigeração e de segurança. Considerando-se a mitigação desses obstáculos, observou-se que a evolução da tecnologia dar-se-á tal qual apresentado no Gráfico 89, segundo os respectivos fatores portadores de futuro.

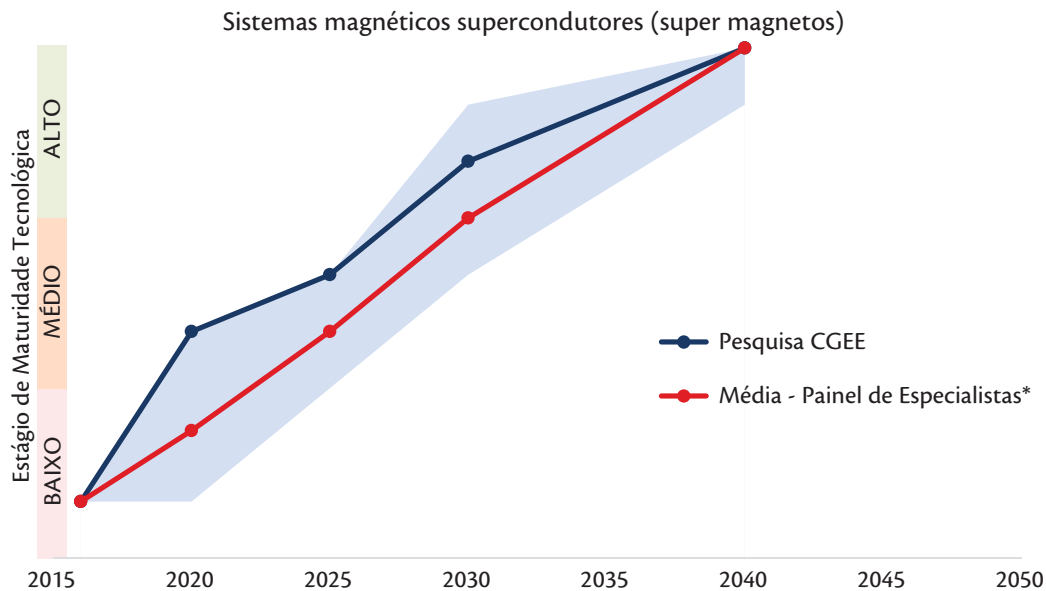


Gráfico 89 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Super magnetos

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 49.

Tabela 49 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Supercapacitores e Super magnetos

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Armazenamento elétrico	Supercapacitores	Fatores portadores de futuro	Crescimento da demanda por armazenamento	Investimentos iniciais (R\$), repotenciação da cadeia de CT&I e da cadeia produtiva	Desenvolvimento das Redes elétricas inteligentes e da GD	Métodos e tecnologias de implantação junto aos sistemas de geração	Protótipos, metodologias e métricas para testes e homologação. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Sistemas magnéticos supercondutores (super magnetos)	Fatores portadores de futuro	Crescimento da demanda por armazenamento	Investimentos iniciais (R\$), repotenciação da cadeia de CT&I e da cadeia produtiva	Desenvolvimento das Redes elétricas inteligentes e da GD	Métodos e tecnologias de implantação junto aos sistemas de geração	Protótipos, metodologias e métricas para testes e homologação. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.



11.3.2. Temática armazenamento eletroquímico – baterias

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade da rota tecnológica desta temática.

Rota - Baterias:

- Baterias chumbo-ácido convencionais: são amplamente utilizadas no setor automotivo. No sistema elétrico são utilizadas como tecnologias de “serviço auxiliar” (sistema de suprimento de energia para os sistemas de comunicação, proteção, automação e controle, e que devem funcionar principalmente quando há falha do SEP) em subestações. As baterias chumbo-ácido são a tecnologia de acumuladores (baterias reversíveis) mais conhecidas, antigas e melhor desenvolvidas, além de apresentarem maior capacidade instalada no planeta. São adequadas aos sistemas que requeiram tempos de armazenamento curtos ou médios.
- Baterias de íons de lítio: são seguras e baratas, e proporcionam altas densidades de energia e podem fornecer picos de potência elevados, sendo as mais utilizadas nas aplicações eletrônicas em geral. Baterias de íons de lítio, que são recarregáveis, não devem ser confundidas com as baterias de lítio (pilhas), que são baterias primárias (não recarregáveis) descartáveis, com lítio ou seus compostos como seu ânodo. Baterias de íons de lítio são sensíveis a temperaturas altas; o eletrólito é inflamável e a densidade de energia é elevada, o que faz com que um defeito interno (como um curto-circuito) possa causar um incêndio.

Considerando-se esses aspectos, observa-se, portanto, a necessidade do desenvolvimento de baterias de alta densidade de energia, com elevadas taxas de carga (carregamento rápido) e descarga (capacidade de atender a elevados picos de demanda) e longa vida útil (capaz de realizar milhares de ciclos de carga e descarga), com baixa perda de capacidade ao longo da vida útil. Além disso, é conveniente que essas tecnologias possuam materiais inertes ou de baixa agressividade ao meio ambiente. À vista disso, é apresentada a evolução da maturidade desta rota no Gráfico 90.

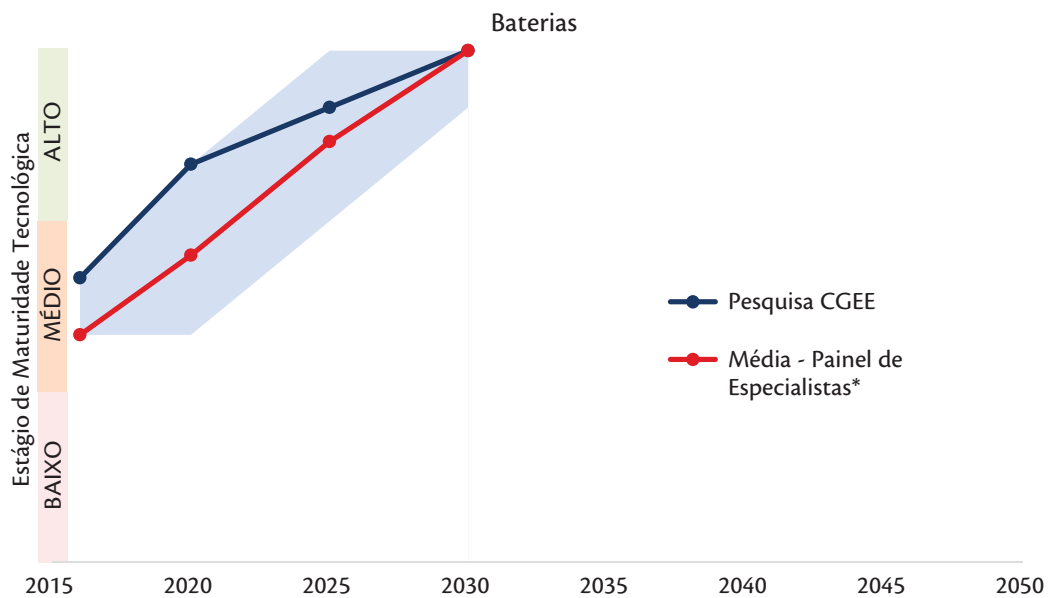


Gráfico 90 - Evolução da maturidade tecnológica da Rota Baterias

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 50.



Tabela 50 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota Baterias

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Armazenamento eletroquímico'	Baterias	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais (R\$) na cadeia de CT&I e de produção, aumento da demanda por sistemas de armazenamento via baterias	Desenvolvimento de microrredes e GD, planejamento de uso da tecnologia de armazenamento eletroquímico	Sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento desenvolvidos, protótipo operante e metodologias e métricas para análise de resultados desenvolvidos	Tecnologias e métodos de implantação dos sistemas de armazenamento e tecnologias de O&M e sistema de monitoramento maduros. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.		
			Maturidade	MÉDIO	ALTO			

Fonte: Elaboração própria.

11.3.3. Temática sistemas de armazenamento térmico

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Armazenamento de energia na forma térmica

Sem retornar à forma de energia elétrica), em baixas diferenças de temperatura é simples, barato, não requer tecnologia complexa; os materiais para isolamento térmico eficiente para estas aplicações

são baratos e facilmente disponíveis. Entretanto, a conversão da energia térmica em outro tipo de energia (mecânica, por exemplo) é complexa, tem baixa eficiência e requer elevadas diferenças de temperatura para melhorar o desempenho e a eficiência do sistema.

- Sistemas térmicos de armazenamento de energia sem transformação de fase: a energia deve ser obrigatoriamente armazenada e recuperada na forma térmica, sendo tecnicamente muito difícil a sua transformação em qualquer outro tipo de energia, por limitações de eficiência dos processos de conversão. Nos sistemas térmicos com elevada diferença de temperatura, é tecnicamente possível a sua transformação em outro tipo de energia (mecânica, por exemplo, e posterior conversão em energia elétrica); entretanto, a eficiência da conversão está ligada à diferença de temperatura entre as fontes quente e fria, e esta diferença fica limitada a algumas centenas de graus Célcius, em função de limitações da engenharia de materiais, o que acaba por penalizar bastante a eficiência dos processos de conversão.
- Sistemas de armazenamento de energia térmica com transformação de fase: estão relacionados à troca de energia acompanhando transformações como misturas e transições de fases. No caso de o fluido de trabalho ser a água, por exemplo, o calor específico é de uma caloria/gr.°C, isto é, são necessárias cem calorias para levar uma grama de água líquida desde 0 °C até 100 °C; já o calor latente de fusão é de 79,8 caloria/grama, e o calor latente de vaporização é de 539,1 caloria/grama. Alguns prédios e instalações de grande porte, por exemplo, dispõem de sistemas de produção de gelo (em grandes quantidades) durante os períodos em que a energia elétrica está disponível em menor preço, ou quando há folga na demanda contratada com a concessionária (usualmente durante a madrugada), e o utilizam para a produção de água gelada ao longo do dia, que, por sua vez, é utilizada no sistema de ar-condicionado, auxiliando na redução do consumo de energia ao longo do dia e, especialmente, no horário de ponta. Esta forma de armazenamento de energia não retorna para a energia armazenada na forma de energia elétrica, mas é importante porque pode interferir (positivamente) na utilização e na eficiência da operação das redes elétricas.

A partir das respectivas naturezas, observa-se que os maiores desafios a serem superados dizem respeito à forma de armazenamento térmico sem transformação de fase. Neste contexto, observa-se que o desenvolvimento de materiais com elevada capacidade térmica (capacidade de armazenar grande quantidade de energia por unidade de massa), a capacidade de isolamento térmico eficiente, em grandes diferenças de temperatura (a eficiência e o rendimento do ciclo de carga e descarga estão relacionados com a diferença de temperatura entre as fontes quente e fria), e o desenvolvimento de materiais capazes de operar em elevada temperatura, sem perda acentuada de vida útil, correspondem às questões mais importantes para serem desenvolvidas nesta rota. Desta forma, observou-se que a evolução da maturidade para as duas rotas limita-se a esta questão que é a mais promissora, porém de maior dificuldade em termos desenvolvimentistas (ver Gráfico 91).

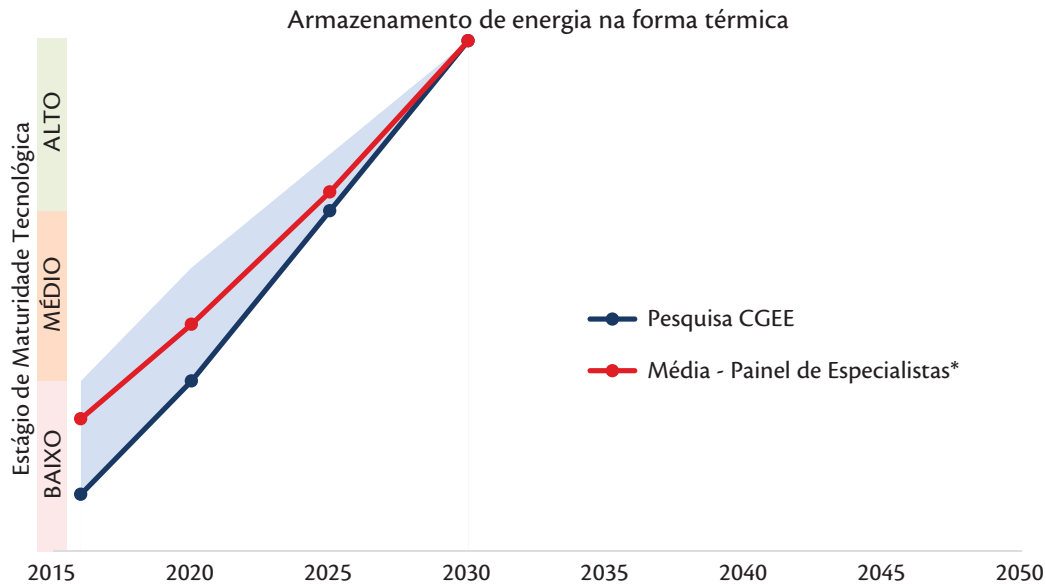


Gráfico 91 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Armazenamento Térmico com e sem Transformação de Fase

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Sistemas termoquímicos de armazenamento

Utilizam-se de reações químicas reversíveis capazes de absorver ou produzir calor; segundo a literatura, além de não apresentar um “limite de carregamento”, como as baterias elétricas, o material químico não se descarrega ao longo do tempo. Como a energia é armazenada por meio de processos físico-químicos, reduz-se ou quase se eliminam as perdas térmicas. Com o objetivo de elevar a eficiência dessa tecnologia, observam-se alcançar densidades de energia superiores à do armazenamento químico, e com baixas perdas, uma vez que a energia é armazenada em uma reação química reversível (ver Gráfico 92).

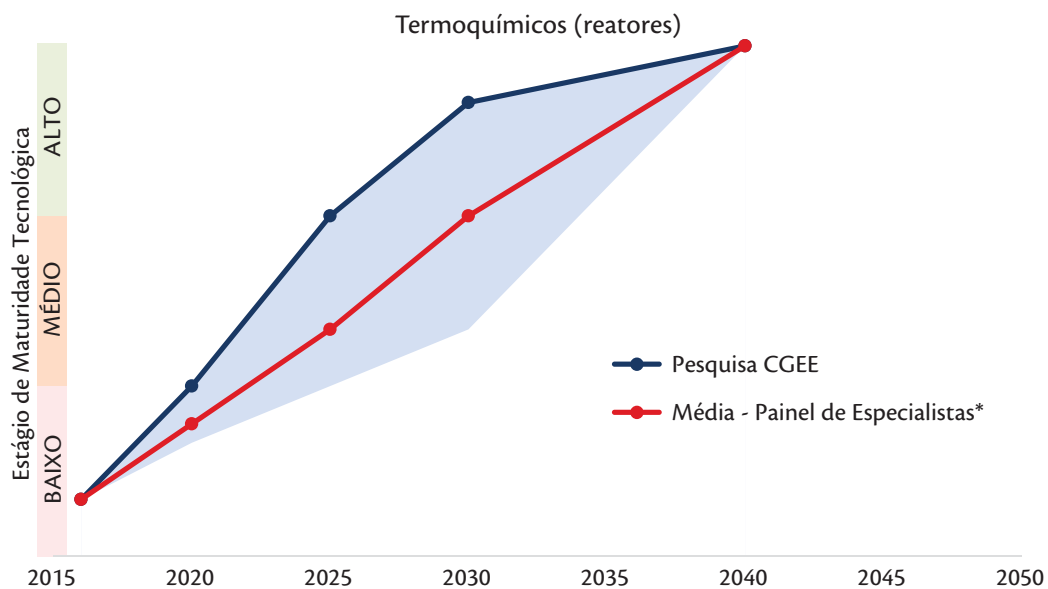


Gráfico 92 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Termoquímicos (reatores)

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 51.



Tabela 51 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistemas de Armazenamento de Energia Térmica com Transformação de Fase e Termoquímicos (reatores)

Temática	Rota	Dado	Período						
			2016	2020	2025	2030	2040	2050	
Temática Armazenamento térmico	Com e sem transformação de fase	Fatores portadores de futuro'	Aumento da demanda por armazenamento de energia, Investimentos iniciais, investimento em conhecimento (CT&I) e na cadeia produtiva.	Desenvolvimento da GD pesquisa sobre novos materiais	Desenvolvimento de novos materiais	Sistemas de implantação e de integração entre fontes de energia desenvolvidos. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.			
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO			
	Termoquímico	Fatores portadores de futuro	Aumento da demanda por armazenamento de energia, Investimentos iniciais, investimento em conhecimento (CT&I) e na cadeia produtiva.	Desenvolvimento da GD pesquisa sobre novos materiais	Desenvolvimento de novos materiais	Estudos em sistemas piloto de armazenamento de energia integrado a sistemas de geração de energia	Sistemas de implantação e de integração entre fontes de energia desenvolvidos. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO			

Fonte: Elaboração própria.

11.3.4. Temática sistemas de armazenamento mecânico

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Bombeamento Reverso

Novas tecnologias para a aplicação desses sistemas na matriz elétrica brasileira, interação com reservatórios hídricos e com a geração existente, em especial considerando a rápida introdução e o crescimento da geração intermitente (eólica e solar), e a possibilidade de otimização de fluxos de potência, obtenção de maior eficiência operacional e redução de perdas técnicas são objetos de desenvolvimentos a serem alcançados (ver Gráfico 93).

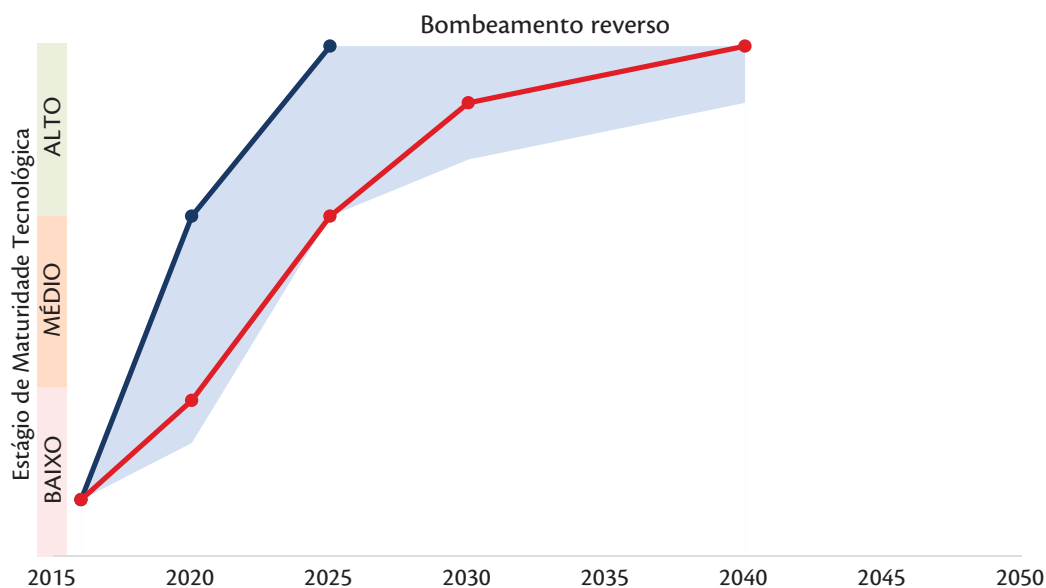


Gráfico 93 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Bombeamento Reverso

Fonte: Elaboração própria.



Rotas - Sistemas de Armazenamento de Ar Comprimido - *Compressed Air Energy Storage* (Caes) e Ar Liquefeito (*Liquid Air Energy Storage* (Laes))

Utilizam energia elétrica nos horários de menor custo (fora de ponta) para comprimir o ar e estocá-lo em um reservatório de grande volume, como uma caverna subterrânea em pressão superior à atmosférica (Caes) ou em cilindros (Laes). Quando a energia é requerida, o ar comprimido é expandido através de uma turbina, produzindo trabalho mecânico, convertido em energia elétrica. Durante o processo de armazenamento, o ar é comprimido por um compressor, acionado por um motor; neste processo, o ar se aquece; o calor é removido por um radiador. A energia é armazenada como ar comprimido em um reservatório e, no processo de descarrega, o ar é expandido e resfriase, devendo então ser aquecido por uma fonte externa de calor. Também existem os sistemas Caes e Laes adiabáticos, que armazenam o calor gerado durante o processo de compressão. Durante o processo de descarga (expansão), o calor armazenado pode ser usado para aquecer o ar, aumentando a eficiência do processo em até 20%. Observa-se, portanto, uma oportunidade de desenvolvimento desses sistemas adiabáticos, levando-se em conta a recuperação do calor produzido durante o ciclo de compressão, para posterior uso no ciclo de expansão. Neste sentido, o Gráfico 94 e o Gráfico 95 apresentam a evolução da maturidade tecnológica das respectivas rotas.

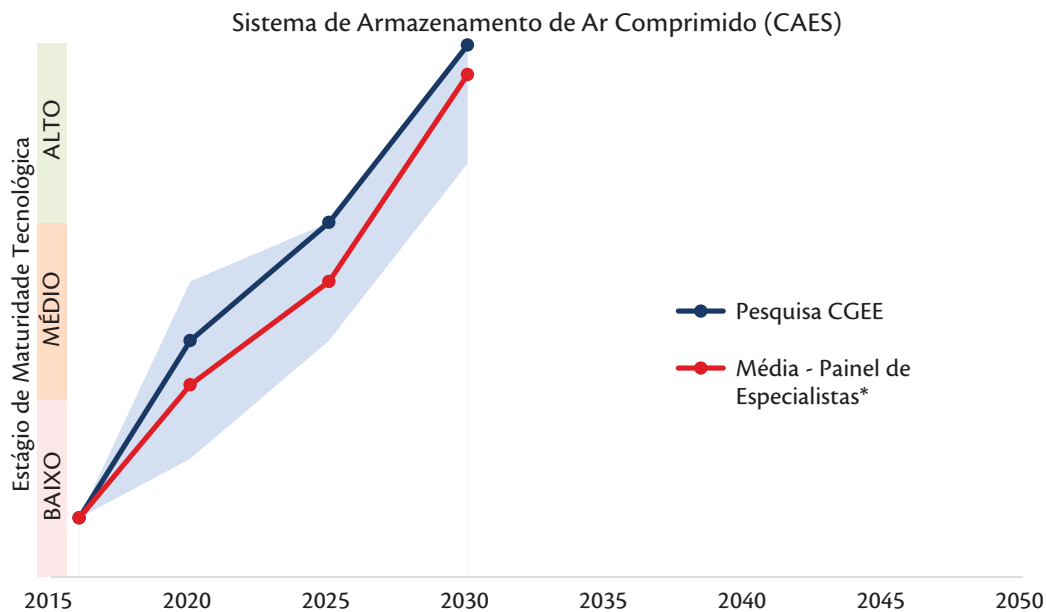


Gráfico 94 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Caes

Fonte: Elaboração própria.

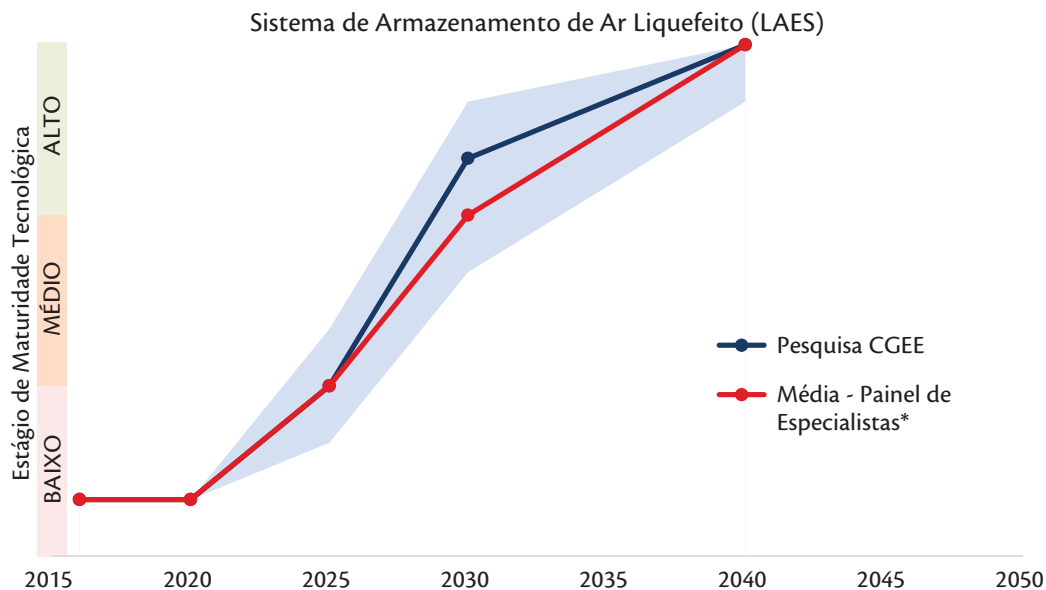


Gráfico 95 - Evolução da maturidade tecnológica da rota LAES

Fonte: Elaboração própria.

Não mesmo importante, o desenvolvimento de tecnologias de integração desses sistemas à matriz elétrica brasileira, considerando-se a sua interação com os reservatórios hídricos e com a geração existente, e a possibilidade de otimização de fluxos de potência, obtenção de maior eficiência operacional e redução de perdas técnicas, também são desafios que precisam ser superados para elevar a maturidade dessas rotas.

Rota - Volante de inércia

Desenvolvimentos nos sistemas de controle e balanceamento dos rotores (ou volantes de inércia) e o desenvolvimento de mancais de baixo atrito, por meio de novos materiais que representem baixo risco no caso de falha mecânica com colapso do rotor etc. (resistentes ao stress mecânico). A característica evolutiva dessas questões é apresentada no Gráfico 96.

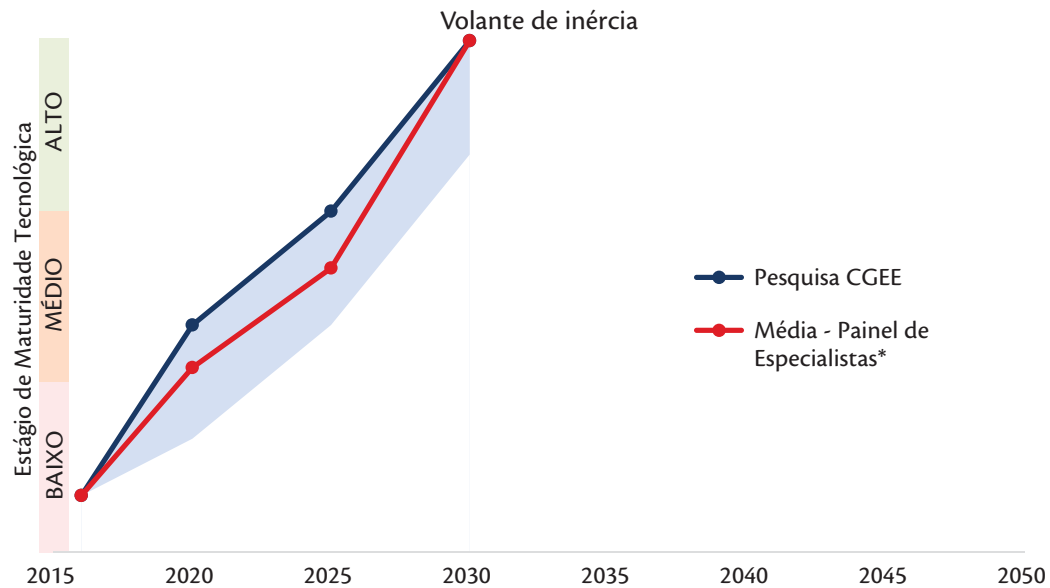


Gráfico 96 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Volante de Inércia

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas tecnológicas são apresentados na Tabela 52.

Tabela 52 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Bombeamento Reverso, Laes, Caes e Volante de Inércia

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Armazenamento mecânico	Bombeamento reverso	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais, aumento da participação das fontes renováveis	Desenvolvimento de tecnologias de conversores de energia, O&M, integração entre fontes, cadeia produtiva	Desenvolvimento de tecnologias de conversores de energia, O&M, integração entre fontes	Otimização das estratégias de operação do despacho de energia, Tecnologias de testes e implantação.		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	CAES	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais, disseminação do assunto na CT&I, aumento da demanda por novas formas de armazenamento de energia, desenvolvimento de compressores mais eficientes	Desenvolvimento de compressores mais eficientes, aumento da confiabilidade estrutural dos equipamentos (materiais), cadeia produtiva, desenvolvimento da GD	Desenvolvimento de sistemas de integração entre fontes de geração e sistemas tipo CAES, protótipo em escala real	Otimização das estratégias de operação do despacho de energia, Tecnologias de testes e implantação. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da tecnologia e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos da tecnologia e periféricos		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	LAES	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais, disseminação do assunto na CT&I, aumento da demanda por novas formas de armazenamento de energia, desenvolvimento de compressores mais eficientes	Desenvolvimento de compressores mais eficientes, aumento da confiabilidade estrutural dos equipamentos (materiais), cadeia produtiva, desenvolvimento da GD	Desenvolvimento de compressores mais eficientes, aumento da confiabilidade estrutural dos equipamentos (materiais), protótipo em escala real	Desenvolvimento de sistemas de integração entre fontes de geração e sistemas tipo LAES	Otimização das estratégias de operação do despacho de energia, tecnologias de testes e implantação. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	Volante de inércia	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais, disseminação do assunto na CT&I, aumento da demanda por novas formas de armazenamento de energia, desenvolvimento de compressores mais eficientes	Cadeia produtiva, aumento da eficiência do sistema mecânico (mitigar atrito), desenvolvimento da GD, desenvolvimento de sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Aumento da eficiência do sistema mecânico (mitigar atrito), desenvolvimento da GD, desenvolvimento de sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento, protótipo em escala laboratorial	Aumento da eficiência do sistema mecânico (mitigar atrito), desenvolvimento da GD, protótipo em escala real, desenvolvimento de sistemas de O&M e monitoramento, aumento da vida útil.	Tecnologias de testes e implantação. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução em custos de fabricação.	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			

Fonte: Elaboração própria.



11.3.5. Temática armazenamento químico

Roadmap tecnológico

Embora se possa considerar o armazenamento do hidrogênio como armazenamento químico, no âmbito deste trabalho a ênfase é dada ao armazenamento do syngas. O armazenamento do hidrogênio é abordado nesse livro, na macrotemática geração de energia elétrica via hidrogênio e/ou células a combustível.

Rota - Armazenamento em forma de gás

Syngas, ou gás sintético, surge como uma alternativa de armazenamento de hidrogênio. O syngas pode ser produzido aquecendo-se o hidrogênio e o dióxido de carbono em um recipiente fechado, em uma reação exotérmica conhecida como “Metanização”, ou reação de *Fischer-Tropsch*. O produto final é gás metano sintético, idêntico ao gás natural, compatível com toda a infraestrutura de gás já existente - maior vantagem do metano sobre o hidrogênio, além de que o manuseio de hidrogênio é muito mais complexo que o manuseio do metano. O metano produzido pode ser armazenado no sistema de armazenamento e distribuição do gás natural já existente em algumas grandes cidades do mundo. Essas técnicas podem ser refinadas ou otimizadas. Além disso, tecnologias relacionadas ao aproveitamento da energia térmica gerada no processo de armazenamento do gás devem ser desenvolvidas (ver Gráfico 97).

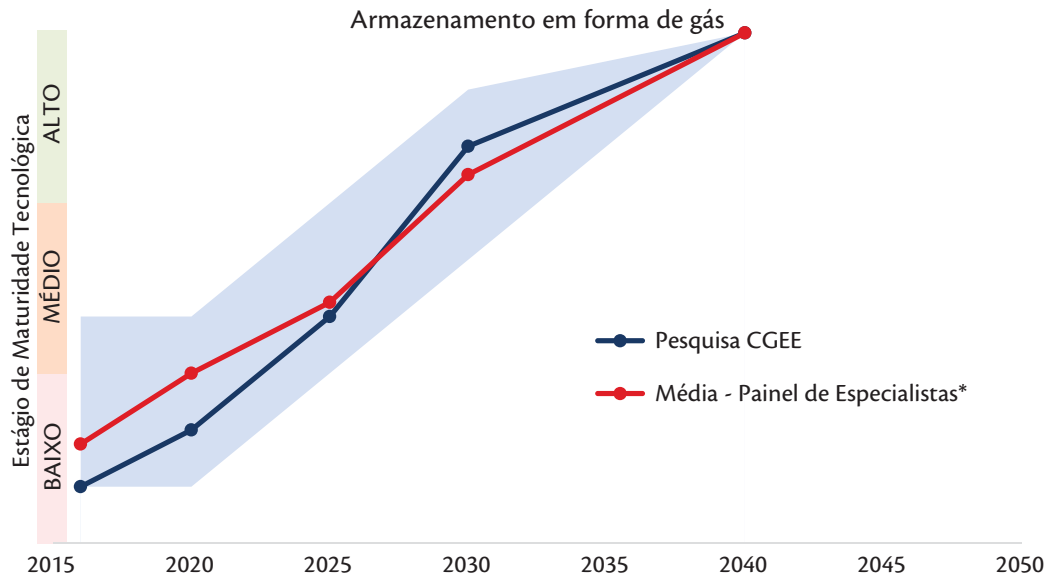


Gráfico 97 - Evolução da maturidade tecnológica da rota armazenamento em forma de gás

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade da respectiva rota tecnológica são apresentados na Tabela 53.

Tabela 53 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota Armazenamento em Forma de Gás

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática armazenamento químico	Armazenamento em forma de gás (Syngas)	Fatores portadores de futuro	Investimentos iniciais, aprimoramento do gerenciamento de RSU, planejamento do uso de RSU	Desenvolvimento de técnicas para a produção eficiente do Syngas	Desenvolvimento, otimização e expansão de sistemas de cogeração	Desenvolvimento, otimização e expansão de sistemas de cogeração, novos métodos de produção do gás	Nova prática de logística do gás. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.



11.3.6. Temática O&M – desenvolvimento de aplicações

Roadmap tecnológico

São apresentadas a seguir as linhas de pesquisa que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológicas desta temática.

Rota - Sistema de Gerenciamento de Baterias (BMS)

Sistemas eletrônicos para o controle de baterias ou de bancos de baterias recarregáveis, que têm por objetivo evitar que a bateria opere fora de sua área de operação segura, além de fornecer informações externas que permitam o acompanhamento de parâmetros típicos de SAEs. Um BMS deve ser ajustado a uma aplicação (ou tecnologia) de baterias específica, uma vez que cada tecnologia requer condições diferentes de operação e diferentes limites de segurança e pode monitorar, em função da complexidade e criticidade do SAE. Alguns desenvolvimentos vêm ocorrendo neste contexto. Dentre eles, o desenvolvimento de algoritmos de BMS adequados à interface com sistemas de supervisão e de controle da operação de sistemas de potência, o desenvolvimento de sistema de gerenciamento de supercapacitores (o P&D relaciona-se à caracterização das baterias e aos limites operativo e de segurança) e de *software* adequado a estas condições. Embora este tipo de desenvolvimento seja contínuo, as técnicas e os *hardwares* associados evoluirão de forma a estabelecer certo nível de confiabilidade e capacidade de adaptação aos quesitos operacionais dos sistemas monitorados (ver Gráfico 98).

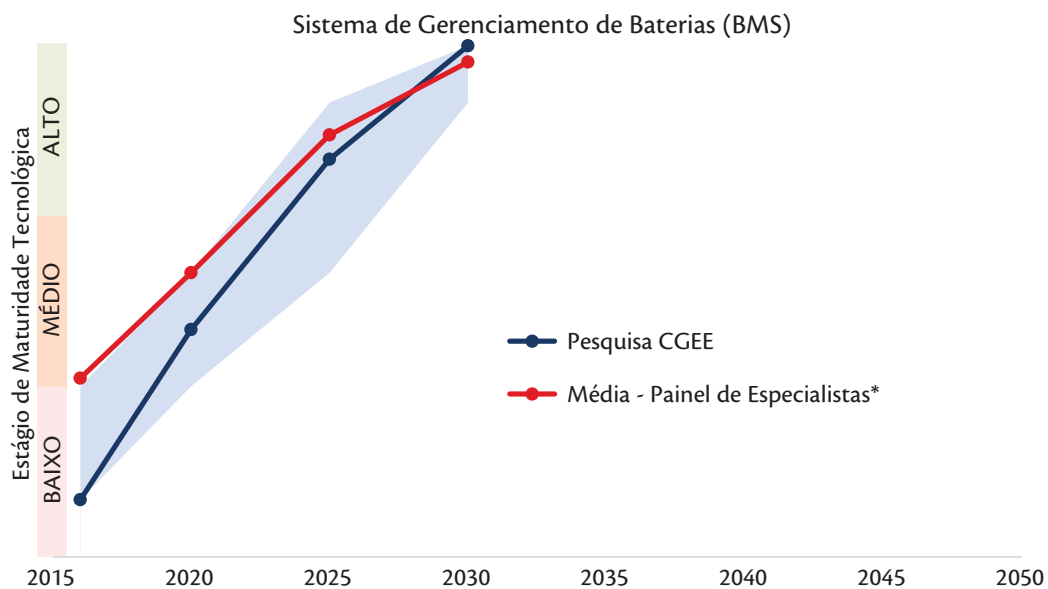


Gráfico 98 - Evolução da maturidade tecnológica da rota BMS

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade da respectiva rota tecnológica são apresentados na Tabela 54.



Tabela 54 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota BMS

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática O&M	BMS Sistemas de gerenciamento de baterias	Fatores portadores de futuro	Investimento em CT&I e cadeia produtiva	Desenvolvimento da GD e microrredes, desenvolvimento de <i>hardwares</i> dedicados.	Desenvolvimento de <i>hardwares</i> dedicados aos sistemas BMS	Tecnologia de implantação e monitoramento das funções dos sistemas BMS. Base técnica e de fomento ativos para o desenvolvimento contínuo da rota e estudo ininterrupto com foco na redução dos custos de fabricação.		
			Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

11.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro.

Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas, conforme apresentado na Tabela 55.

Tabela 55 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	BMS	O&M - Desenvolvimento de aplicações
2	Baterias	Armazenamento eletroquímico
3	Bombeamento reverso	Sistemas de armazenamento mecânico
4	Supercapacitores	Armazenamento elétrico
5	Armazenamento energético em forma de gás	Armazenamento químico
6	Volante de inércia	Sistemas de armazenamento mecânico
7	Armazenamento térmico com e sem transformação de fase	Sistemas de armazenamento térmico
8	Termoquímicos (reatores)	Armazenamento termoquímico
9	Caes	Sistemas de armazenamento mecânico
10	Laes	Sistemas de armazenamento mecânico
11	Supermagnetos	Armazenamento elétrico

Fonte: Elaboração própria.

Dada a natureza das empresas financiadoras do Programa de P&D regulado pela Aneel (operadores de sistemas de potência), a natureza elétrica do Armazenamento de Energia que conduz a priorização das rotas tecnológicas ocorre tal qual apresentado na Tabela 55.

Com o aumento do uso de fontes intermitentes na matriz elétrica, observa-se a necessidade do armazenamento de energia para suprir os possíveis déficits de energia durante os instantes de baixa produção dessas fontes. As rotas de natureza elétrica podem ser utilizadas com sistemas de geração de pequeno a grande porte, já que baterias, por exemplo, possuem a qualidade do empilhamento (modularidade). No caso da rota tecnológica Mecânicos, a tecnologia mais promissora é a de armazenamento hídrico. Neste contexto, o acúmulo de energia pode alcançar patamares gigantescos, capazes de suprir o déficit de energia elétrica por horas, ou dias, na falta de uma grande usina hidroelétrica, por exemplo.

Sistemas eletrônicos e *softwares* de supervisão e controle de baterias, novos materiais que assegurem a confiabilidade, a durabilidade, a segurança e que minimizem impactos ambientais nos processos



de fabricação, operação e descarte, são requisitos fundamentais para a integração de sistemas de armazenamento à respectiva matriz.

O foco no uso dos reservatórios hídricos é mais plausível do que em qualquer outro meio de armazenamento, dada a vasta experiência com esses sistemas e principalmente pela favorável condição territorial e de oferta de água.

A PD&I de armazenamento no Brasil deverá focar na adaptação e na inserção de tecnologias conhecidas ao mercado nacional; na disponibilidade de matéria-prima; na capacidade de suprimento em toda a cadeia produtiva; e na adequação às condições ambientais e legais, requisitos para dirigir os esforços de PD&I voltados aos SAEs.

Neste contexto, deve-se assegurar que o Brasil tenha competência nacional (pesquisadores e centro de pesquisas e até empresas pesquisando o assunto) que possa atender aos requisitos definidos acima. Por outro lado, não se observa uma organização dessa massa crítica caracterizada em grupos de pesquisas. Não há, portanto, grupos organizados de pesquisadores voltados aos tipos de armazenamento mecânico, químico e térmico, embora observe-se na literatura trabalhos isolados relacionados a estes tipos de armazenamento.

- No que diz respeito à cadeia produtiva nacional, o Brasil tem uma economia complexa, com um parque industrial bem estabelecido, um bom sistema de ensino de nível médio e superior, e bem distribuído pelo País, que são requisitos básicos para que se tenha uma cadeia produtiva capaz de suportar o desenvolvimento de uma nova tecnologia.
- Com a consolidação dos sistemas de armazenamento de energia, observam-se oportunidades de desenvolvimento da Cadeia Produtiva nos aspectos relacionados à parte essencial dos sistemas de armazenamento, como baterias de alto desempenho e sistemas de gestão das baterias - *hardware* e *software* necessários à gestão dos ciclos de carga e descarga das baterias, essenciais à sua operação segura e à garantia de desempenho durante sua vida útil.

A diversificação da matriz elétrica nacional exigirá, naturalmente, uma gama de sistemas de armazenamento de energia, integrados de forma harmônica, para mitigar os efeitos causados pela intermitência das fontes renováveis, como a eólica e a solar, e para garantir o fornecimento de eletricidade em grandes escalas. Os sistemas de armazenamento de energia não só garantirão a qualidade do fornecimento de energia da futura matriz elétrica nacional, como também contribuirão com a eficiência e a economia de energia.

Sob o aspecto da CT&I, o desenvolvimento dos respectivos sistemas será responsável pela formação e pela caracterização dos grupos de pesquisa dedicados às respectivas rotas, com consequência à geração de nova massa crítica. Neste sentido, observa-se uma grande oportunidade de desenvolvimento de ciência e tecnologia no País.

Com o desenvolvimento da cadeia de CT&I, obrigatoriamente a cadeia produtiva terá de evoluir para atender às demandas comerciais. Fato que pode trazer novos mercados, que darão subsídio ao aumento da capacidade nacional de competir com produtos de qualidade.

Conforme mencionado, as aplicações de SAEs devem atender a diversas demandas, com diferentes requisitos relacionados à(s)/ao(s):

- Quantidade de energia armazenada: algumas aplicações requerem volumes de energia elevados, mas por intervalos de curta duração (como no caso da integração de geração intermitente ao sistema elétrico);
- Aplicações ligadas à segurança energética (suprimento de energia por longos períodos) requerem armazenamento de grandes quantidades de energia, típicos de SES de bombeamento reverso ou de baterias de fluxo;
- Outras aplicações, como as ligadas à arbitragem, ao suprimento durante o horário de ponta e à confiabilidade (suprimento durante falhas do SEP), requerem o armazenamento de grandes quantidades de energia;
- Tempo de resposta, como no caso de aplicações para assegurar a qualidade de suprimento, eliminando afundamentos de tensão;
- Densidade de energia (peso e volume do sistema de armazenamento), importante em aplicações como veículos elétricos, ou em aplicações domésticas, onde o volume, a modularidade, o baixo custo, a baixa manutenção, a segurança e o baixo impacto ambiental (descarte) são requisitos importantes;
- Taxas de transferência de energia, tanto no processo de carga quanto no processo de descarga, determinam o tempo de carga e a capacidade de atender a “surtos de potência”;
- Eficiência e ciclo de vida, muito importante em sistemas sujeitos a repetidos e contínuos ciclos de carga e descarga;
- Capacidade de operar em flutuação, típica de sistemas desenhados para suprir confiabilidade ou atender a serviços ancilares do SEP.
-



Capítulo 12



Capítulo 12

Macrotemática Soluções Apropriadas de Geração de Eletricidade em Regiões Remotas

As soluções apropriadas de geração de energia elétrica têm seu nicho principalmente na eletrificação de áreas remotas (isoladas ou não) e no setor rural, pela diversificação das formas de geração (insumos e sistemas de geração). De fato, a geração dispersa baseada em fontes primitivas de diferentes naturezas começa a assumir um papel de protagonismo nas modernas redes elétricas, com especial destaque para os microssistemas isolados e também para as microrredes com propriedades de resiliência interligadas à rede convencional.

As pesquisas, no contexto do setor elétrico, passaram por diversas etapas, ou ciclos. Dentre elas, a busca por eficiência energética, depois a evolução na produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, com custos competitivos. Hoje, depara-se com a temática de integração dessas fontes como uma das principais dificuldades. Além disso, a aplicação dessas fontes integradas na forma de sistemas híbridos tem demandado importantes inovações tecnológicas nos principais componentes, com o objetivo de adequá-los aos novos regimes operacionais, ambientais e requisitos de confiabilidade.

As necessidades de energia elétrica e as oportunidades específicas de fontes de energia associadas a determinadas áreas e regiões abrem um leque de oportunidades para a elaboração de soluções tecnológicas inovadoras para a exploração eficiente dessas fontes. Entretanto, o serviço elétrico provido deve atender padrões de qualidade e de confiabilidade, independentemente de onde este seja fornecido, adicionando complexidade e custos às soluções. Nesta categoria, estão as comunidades isoladas não interligadas na rede convencional (ilhas, regiões de difícil acesso) e as áreas rurais, atendidas por extensões de rede com serviço de energia elétrica deficiente. Para estes casos, a exploração de fontes locais de energia torna-se uma oportunidade ímpar para ter serviço de eletricidade (sistemas isolados) ou para melhorar aquele já existente.

Por outro lado, para as áreas rurais, assim como para as regiões remotas conectadas ao SIN, a existência dessas fontes locais caracteriza uma oportunidade de gerar energia elétrica para o SIN na

forma distribuída/dispersa. A integração dessas fontes diversificadas caracteriza sistemas híbridos de geração de energia, o que exige tecnologia para que essas formas de geração se tornem equivalentes aos padrões de qualidade exigidos no SIN.

A utilização de fontes de energia renováveis locais é uma alternativa para o atendimento de comunidades isoladas. Vários tipos de fontes renováveis de energia são passíveis de serem utilizadas, dependendo do local em questão. No Brasil, os sistemas de geração híbrida surgiram como uma alternativa de atender centros de consumo isolados. Exemplos são as comunidades residentes em áreas de difícil acesso e, em particular, em ilhas marítimas. Nessas localidades, o fornecimento de energia elétrica, se existente, tem sido feito de forma precária, usando geradores a diesel, com operação média de três a quatro horas por dia. As razões desta prática se fundamentam no custo de operação e manutenção e nas dificuldades logísticas para o transporte de combustível.

No meio rural e em áreas próximas a centros urbanos, surgem novas oportunidades de fontes energéticas, por exemplo, o biogás, os resíduos sólidos, a biomassa, a energia heliotérmica e algumas formas de cogeração. Sem esquecer as fontes renováveis tais como a solar fotovoltaica, a eólica e a de aproveitamento hidrocinético em rios ou micro-hidrelétricas a fio d'água.

Um desafio comum dessas fontes diversificadas é a sua disponibilidade intermitente, dificultando seu controle e despachabilidade. Considerando-se que o serviço elétrico deve ser fornecido em forma contínua e confiável, é necessário incorporar mecanismos reguladores que mitiguem esta intermitência. Um caminho é a combinação de vários tipos de fontes, de forma a explorar algum grau de complementariedade existente. Outra alternativa bastante utilizada são os sistemas de armazenamento de energia, tais como os bancos de baterias. Para integrar estes componentes, são utilizados sistemas conversores eletrônicos.

No contexto *on-grid*, as formas de produção de eletricidade variam bastante, dependendo das fontes disponíveis, assim como das restrições físicas e ambientais para a instalação desses geradores. A existência de geração distribuída *on-grid* contribui para tornar realidade o conceito de *microgrids* resilientes, isto é, com microrredes com capacidade de sobrevivência em caso de perda da rede principal, permitindo a configuração de uma ilha energizada autônoma. Para este tipo de operação, dispositivos de armazenamento são necessários.

Na operação interligada normal, a presença de sistemas de armazenamento distribuídos cumprirá outro papel de grande relevância nos próximos anos. Eles contribuem para a flexibilidade equivalente do sistema, sendo acionados na mitigação da intermitência de parques eólicos. Portanto, a presença de recursos de



armazenamento distribuídos ao longo da rede favorece a inserção de fontes intermitentes de grande escala no sistema interligado nacional, sejam parques eólicos, sejam geradores solares de grande porte.

A partir da análise apresentada, a macrotemática dá lugar a duas temáticas: sistemas isolados e sistemas conectados ao SIN. Cada uma é decomposta em duas subtemáticas, que convergem para três rotas transversais como mostrado na Figura 22.

Considerando-se este cenário, a macrotemática foi estruturada tal qual mostrado na Figura 22, para direcionar as considerações que serão feitas neste trabalho.

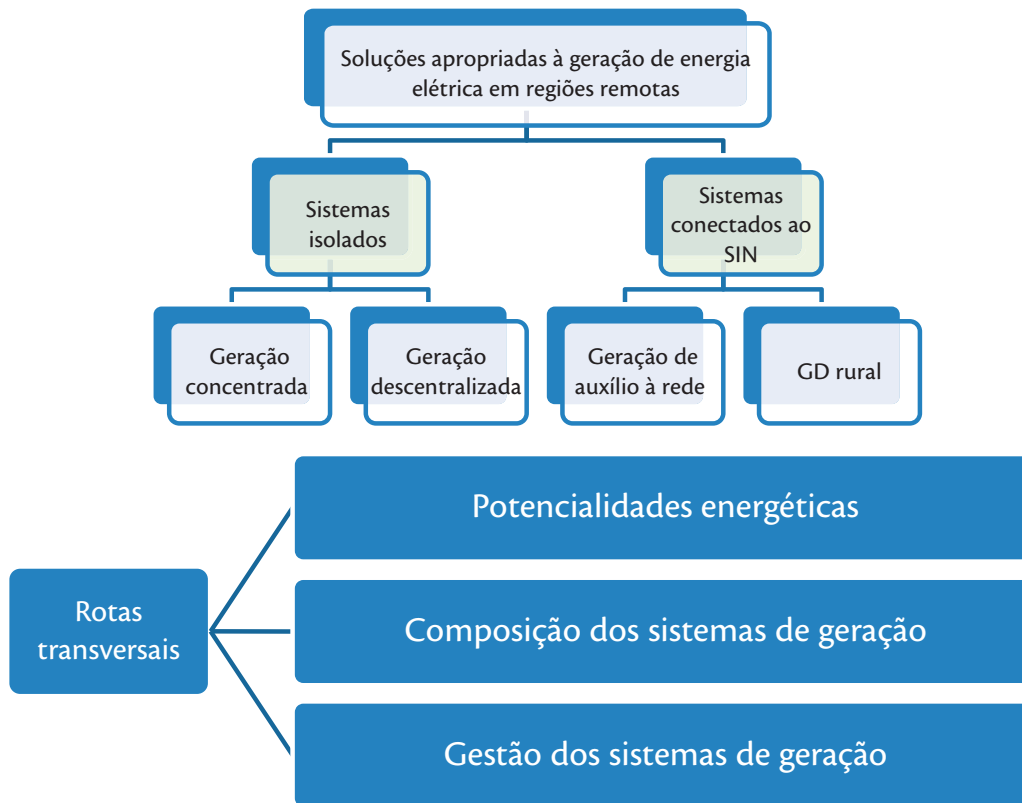


Figura 22 - Caracterização da macrotemática Soluções Apropriadas para a Geração de Energia Elétrica em Regiões Remotas (preenchimento na cor verde, temáticas; sem preenchimento; rotas tecnológicas)

Fonte: Elaboração própria.

Conforme apresentado na Figura 22, as rotas denominadas transversais são consideradas em cada uma das rotas. Portanto, as considerações a serem feitas neste trabalho dizem respeito às 12 rotas tecnológicas.

Na temática sistemas isolados, serão abordadas as tecnologias para a geração concentrada, relacionadas ao mapeamento e à caracterização dos insumos energéticos locais, às configurações dos sistemas de geração (sistema híbrido ou não híbrido) e às tecnologias de gestão do empreendimento do sistema de geração (tecnologias de O&M e monitoramento).

As tecnologias dedicadas à geração descentralizada são abordadas nos mesmos contextos. Neste aspecto, o termo descentralizado diz respeito à geração de eletricidade por meio de vários sistemas de geração (híbridos ou não híbridos) interligados em uma microrrede. Neste caso, as tecnologias relacionadas às rotas transversais se estendem à natureza das tecnologias de sistemas de distribuição da energia elétrica em pequenas escalas.

Conforme mencionado, as soluções tecnológicas para a geração de energia elétrica em regiões remotas devem abordar os sistemas isolados e os sistemas conectados ao SIN. As terminologias regiões remotas e sistemas conectados ao SIN dizem respeito àquelas regiões que, embora tenham conexão com o SIN, precisam de um aporte tecnológico para a manutenção do fornecimento de energia elétrica. Isso é justificado, dentre outros motivos, pela fragilidade da infraestrutura da concessionária local em fornecimento de energia elétrica (sobrecarga, necessidade de instalação de subestações e custos de instalações que tornam possível a conexão segura ao SIN).

A GD rural aborda as tecnologias relacionadas à geração de energia elétrica tendo como principal aporte na geração o uso de sistemas de cogeração (aproveitamento energético de processos). Tal qual as demais rotas, as tecnologias da GD rural consideram as respectivas rotas transversais.

12.1. Visão de futuro

12.1.1. Cenário setorial

Segundo a EPE, o número de domicílios particulares permanentes com energia elétrica passará de 63 milhões em 2013 para cerca de 98 milhões de unidades em 2050, sendo atingido um grau de 100% de atendimento do serviço de fornecimento de energia elétrica.



Em termos de consumo residencial, estima-se que em 2050 seja alcançado o patamar de 336 TWh, um crescimento de 170% em relação ao consumo de 124 TWh registrado em 2013. Para alcançar um patamar de 100% de atendimento de serviço de energia elétrica, as opções com GD são fundamentais como solução para áreas isoladas no País. Em termos de GD, estima-se uma participação crescente em torno de 10% até 2030, seguida depois com taxas menores. Com algum grau de aproximação, podemos associar essa taxa de crescimento para GD em áreas rurais e isoladas, especialmente, às fontes eólica e fotovoltaica. A utilização de células combustíveis em SHs não apresenta competitividade atualmente quando comparada com a utilização das baterias. Entretanto, continua sendo uma opção tecnológica a ser pesquisada para armazenamento.

12.1.2. Objetivo geral

O foco dos investimentos em PD&I está direcionado ao desenvolvimento de tecnologias de integração de fontes energéticas para atender aos sistemas observados em regiões remotas (isoladas e conectadas ao SIN, com ou sem GD). Neste contexto, deve ser dada ênfase ao desenvolvimento de tecnologias e de dispositivos para atingir uma alta confiabilidade de serviço elétrico. Na operação de sistemas de geração em regiões remotas, o investimento em PD&I deve ser direcionado ao desenvolvimento de componentes de integração entre fontes e entre sistemas de armazenamento, e aos sistemas de O&M e monitoramentos dos sistemas de geração.

12.1.3. Objetivo específico

As diretrizes identificadas para atender ao objetivo geral da macrotemática estão alocadas em diferentes períodos. Para tanto, foi considerada a prioridade de execução dessas diretrizes, que incluem:

Curto Prazo (2017-2020)

- Mapear as fontes energéticas, considerando as potencialidades de cada região e as respectivas topologias de sistemas.

Médio Prazo (2020-2030)

- Desenvolver ou aperfeiçoar tecnologias e práticas de beneficiamento da biomassa para a geração de energia;

- Desenvolver tecnologias práticas de beneficiamento dos resíduos sólidos urbanos, e no meio rural, a partir de resíduos agropecuários para a geração de eletricidade;
- Desenvolver conversores inteligentes, eficientes e confiáveis para a integração de fontes intermitentes e sistemas de armazenamento de energia;
- Desenvolver microgeradores eólicos robustos adaptados às condições ambientais do Brasil;
- Desenvolver ou otimizar turbinas hidráulicas hidrocinéticas e de baixa queda;
- Desenvolver metodologia e dispositivos para mitigar desequilíbrios de fase em sistemas híbridos;
- Desenvolver metodologias de gerenciamento do carregamento do banco de baterias;
- Desenvolver sistemas de monitoramento e controle flexível para a operação integrada das fontes energéticas disponíveis visando à segurança e à confiabilidade;
- Desenvolver metodologias de gestão para os sistemas de microgeração.

Longo Prazo (2030-2050)

- Desenvolver modelos e ferramentas automáticas de gestão operativa para operação autônoma (*off-grid*) e operação integrada com a rede (*on-grid*);
- Caracterizar o comportamento e o desenvolvimento de sistemas inovadores de geração como reatores nucleares de pequeno e médio portes e células a combustível, para aplicações em sistemas híbridos de energia.

12.1.4. Fundamentação

Segundo a EPE, em 2050 o consumo de energia elétrica no Brasil deve ser triplicado, tendo como referência o ano de 2013, projetando uma capacidade instalada em torno de 400 GW e 480 GW. Por outro lado, a população brasileira crescerá a um ritmo cada vez menor e começará a declinar a partir da década de 1940. O PIB terá uma taxa crescente até meados de 2030, passando um período de estabilidade, para em seguida crescer a taxas menores. O consumo *per capita* apresentará uma taxa crescente até 2050, reflexo da evolução positiva do PIB e dos novos serviços energéticos disponíveis para o consumidor. Para atender à demanda futura, a fonte hidrelétrica continua a ter um papel relevante na expansão da geração. Segundo a EPE, o limite inventariado hoje é de 172 GW, sendo que este limite pode ser alcançado entre 2030 e 2040. Para atender a meta prevista, são necessários mais de 100 GW, que deverão vir de outras fontes, com ênfase em renováveis. Como consequência,



aspectos ligados ao meio ambiente podem dar espaço a entraves na expansão do parque gerador, assim como as restrições para reservatórios devem estimular a procura por novas soluções para o armazenamento de energia.

No horizonte de 2050, a participação da energia eólica deve crescer significativamente em relação à hidrelétrica. Entretanto isto deverá ser acompanhado pelo aumento de dispositivos de armazenamento e de reserva de geração, tais como turbinas a gás de ciclo aberto. A diversificação da matriz energética deve evoluir em consonância com os requisitos de segurança energética do SIN e com princípios da modicidade tarifária. Isto abre oportunidade para a GD, cuja participação será crescente, permeando todos os segmentos de consumo até alcançar aproximadamente 10% do mercado de energia. Uma parcela importante de GD baseada em fontes fotovoltaica e eólica entrará no mercado integrando sistemas híbridos, que podem ter sistemas de armazenamento associados. Um importante desafio é compatibilizar fontes intermitentes e fornecer energia nos padrões de tensão senoidal e frequência constante. Este requisito é válido tanto para a operação *on-grid* quanto para a *off-grid* (sistema isolado).

A GD deve estar presente em diferentes formas, dependendo das potencialidades energéticas locais. Nos sistemas isolados, os arranjos híbridos surgem como uma importante alternativa de geração de energia. Na área rural, a exploração de recursos como o biogás, os resíduos sólidos, a biomassa, a hidroeletricidade em pequena escala etc. deve ser levada em conta como alternativa de novas formas de geração dispersa, tanto para autoconsumo, quanto para contribuir na forma de produtores independentes ao SIN. No contexto urbano, diferentes tipos de GD, frequentemente de natureza intermitente, se conectam com a rede. No futuro, com o estabelecimento das redes inteligentes, essas fontes distribuídas, combinadas com sistemas de armazenamento, poderão dar o suporte energético para a constituição de microrredes resilientes.

Após essa exposição, torna-se evidente a necessidade de investir em ações de PD&I para desenvolver com eficiência e competitividade as rotas tecnológicas associadas à macrotemática, pelos seguintes motivos, dentre outros:

- Desenvolver ou adequar tecnologias para o aproveitamento eficiente das oportunidades energéticas provenientes de fontes renováveis e de reaproveitamentos como o biogás e os resíduos sólidos;
- Criar padrões de integração de fontes de energia diversificadas, incluindo a capacidade de armazenamento para a geração distribuída;
- Possibilitar a integração e o controle de dispositivos de armazenamento no sistema interligado no auxílio à alta penetração de renováveis não convencionais.

Observe-se a interdependência desta macrotemática com outras, implícita ou explicitamente citadas anteriormente. São estas: Sistemas de Armazenamento, Redes de Energia Inteligentes, Geração Eólica e Fotovoltaica. Estas macrotemáticas se veem favorecidas com a evolução de soluções apropriadas para a geração de energia elétrica, reforçando a necessidade de investir estrategicamente em atividades de PD&I para aprimorar tecnologias e a competitividade nesta macrotemática.

Considerando-se que um grande percentual da GD é de natureza intermitente, os conversores eletrônicos são peça fundamental na integração desse tipo de fonte. Os conversores têm recebido atenção de fabricantes nacionais, que conseguiram desenvolver produtos de bom padrão para o mercado interno. Entre as empresas, o destaque é para a Schneider S. A., que recebeu há alguns anos vários reconhecimentos nacionais pelos conversores produzidos. Em termo de dispositivos de armazenamento, existe no Brasil um parque industrial maduro em baterias chumbo ácido, inclusive com um centro de pesquisa. A evolução da linha de produção para baterias de alta ciclagem (ultrabaterias) parece natural. Entretanto, outros tipos de baterias promissoras, tais como a íon-lítio, podem se tornar competitivas.

A evolução desta macrotemática pode contribuir para a aceleração (em graus diferenciados) das demais aqui citadas, ofertando tecnologia competitiva para a disseminação da geração distribuída híbrida no ambiente urbano, incrementando a flexibilidade do sistema interconectado nacional e contribuindo para a construção das redes de energia inteligentes.

12.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base na visão de futuro e na caracterização desta macrotemática, o cenário da macrotemática energia eólica foi caracterizado em resposta a um conjunto de métricas (ver Anexo) que permeiam os assuntos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado. Neste contexto, as respectivas métricas foram aplicadas para a macrotemática de forma geral e para cada uma das rotas consideradas neste estudo, levando-se em conta o período até 2050.

No que diz respeito à evolução tecnológica, foram consideradas as seguintes métricas:



- Razão (confiabilidade/custos): caracteriza a evolução do aumento da confiabilidade tecnológica *versus* custos da aplicação da tecnologia. Estima-se que esta evolução deva ser permanente no período considerado;
- Aumento da robustez e da vida útil de componentes: apresenta a evolução das tecnologias no que diz respeito ao aumento de confiabilidade e à elevação da vida útil. Espera-se que em 2050 a tecnologia alcance o máximo de confiabilidade, considerando-se a macrotemática;
- Nível de automação para sistemas híbridos: esta métrica apresenta a evolução tecnológica dos sistemas de integração e automação da geração híbrida, visando à operação confiável dessa fonte. No contexto da macrotemática, estima-se que essa evolução deva ser contínua no período considerado;
- Produção de microturbinas eólicas nacionais: caracteriza a entrada de microturbinas eólicas de tecnologia nacional no mercado de energia local. Estima-se que até 2050 haja uma participação de 60% a mais dessas tecnologias no setor elétrico, com foco no atendimento a regiões remotas (contexto, macrotemática);
- Produção de painéis fotovoltaicos com participação nacional a custos competitivos: esta métrica apresenta a evolução percentual da participação da tecnologia nacional na produção de painéis fotovoltaicos. Estima-se que até 2050 essa participação alcance o patamar de 90%;
- Melhoria da tecnologia de CaC para reduzir o preço de kW (R\$/kW): a métrica apresenta uma estimativa percentual da redução do preço do kW, em função do aprimoramento das tecnologias de célula a combustível. De uma forma macro, estima-se que essa redução alcance o patamar de 60% em 2050;
- Evolução das redes elétricas inteligentes: a métrica apresenta uma estimativa qualitativa dessa evolução, considerando-se o período até 2050. De uma forma macro, essa evolução deve ser contínua;
- Geração distribuída e microrredes: tal qual a métrica anterior, de uma forma macro, a evolução das tecnologias de GD e de microrredes deve ser contínua até 2050;
- Sistemas de armazenamento: a métrica diz respeito à evolução qualitativa dos sistemas de armazenamento de energia para sistemas remotos. De uma forma macro, essa tecnologia deve evoluir até 2050, com foco no aumento de resiliência e na flexibilidade sistêmica da rede interligada;
- Energias oceânicas: esta métrica diz respeito à correlação da evolução das tecnologias de geração via energia dos oceanos e a sua aplicação em sistemas remotos. No contexto da macrotemática, essa evolução deve ser contínua até 2050.

Neste contexto, portanto, estima-se uma evolução contínua da tecnologia no período de 2017 até 2050, com o aprimoramento de componentes e o uso de novos materiais, melhorando sistematicamente a sua confiabilidade e reduzindo os custos. Esta evolução pode ser representada, aproximadamente, pela razão da vida útil dos sistemas dividida pelo custo. Assim, para 2020 espera-se que esta razão aumente 30%, com uma projeção para 2050 de 100%. Ou seja, um sistema com vida útil de 10 anos e custo de cem unidades monetárias poderá ter, em 2050, uma vida estendida para 12 anos e um custo reduzido para 60 unidades monetárias.

Há outros aspectos que impactam diretamente a evolução tecnológica da macrotemática. Eles são os componentes que fazem parte da arquitetura de geração distribuída híbrida, que considera tipicamente painéis fotovoltaicos, geradores eólicos, geradores hidrocinéticos, dispositivos de armazenamento e células a combustíveis. A disponibilidade desses componentes, a sua evolução tecnológica, a competitividade e os custos, juntamente à existência de cadeias produtivas estáveis, confluem positivamente para a inserção dessas GDs no sistema elétrico.

Observe-se a relação das diferentes formas de geração distribuída com as microrredes e, em escala maior, com as redes elétricas inteligentes. Esta relação é a responsável pela integração e pela microgeração de dispositivos de armazenamento de microrredes para fornecer um serviço de energia elétrica transparente e confiável, com uma gestão energética ótima. Por sua vez, as microrredes são células-mãe das redes inteligentes de energia. Logo, a velocidade com que estas rotas evoluem impacta diretamente a evolução das soluções apropriadas de geração distribuída nos meios urbano, rural e isolado.

Também é clara a relação desta macrotemática com os sistemas de armazenamento. A penetração e a diversificação de soluções de GD como fonte geradora no sistema interligado, assim como em sistemas isolados, são influenciadas pela disponibilidade de sistemas de armazenamento de energia com boa densidade energética, eficiência e preços competitivos.

Por fim, no longo prazo, o surgimento de geradores baseados em energias oceânicas adiciona um grau a mais na diversidade energética dos sistemas híbridos, valorizando a sua aplicabilidade, principalmente para sistemas isolados alocados no litoral ou em ilhas marítimas.

As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado foram apresentadas na planilha de indicadores, conforme instruções constantes na própria planilha.

No contexto da estratégia setorial, as respostas às métricas indicam que o ambiente externo tende a evoluir positivamente com a macrotemática. Esta natureza evolutiva está associada à percepção



dos efeitos benéficos da agregação de fontes renováveis, tanto em operação interligada, quanto em sistemas isolados. No que tange a estes últimos, a maior demanda por atendimento encontra-se em áreas com algum tipo de restrição ambiental, dificultando significativamente as iniciativas de instalação de sistemas híbridos em tais lugares. É importante modernizar a legislação ambiental, de forma a evoluir para um cenário equilibrado e propício para uma boa convivência deste tipo de solução energética com a proteção do meio ambiente.

As formas de GD apropriadas para as áreas rurais e os sistemas isolados se deparam com algumas dificuldades. As razões estão associadas à falta de escala na demanda desse tipo de sistema e aos custos dos componentes, com grande participação de importados. Visualiza-se a necessidade de uma política voltada para duas frentes: incentivar a instalação desse tipo de sistema com uma política de subsídio para estimular o mercado e, por outro lado, criar uma política de incentivo à PD&I, objetivando o aumento de participação nacional nos componentes e estimulando a formação de cadeias produtivas nacionais.

Por meio das métricas relativas ao contexto socioambiental, observa-se uma melhoria da percepção do País quanto à redução de emissões, com iniciativas concretas na forma de uma legislação ambiental moderna, mas que precisa de ajustes para incorporar a flexibilidade para alcançar uma conjugação adequada com o desenvolvimento econômico.

Sendo as fontes renováveis as principais fontes de energia que compõem os SHs, os benefícios da redução das emissões vêm acompanhados de impactos locais. Por exemplo, o sombreamento causado por painéis fotovoltaicos que causa a perda de área agrícola; turbinas eólicas precisam de área de servidão, além de aumentarem a poluição sonora; geradores diesel têm emissões e poluição sonora. Entretanto, arranjos físicos adequados que combinem o uso múltiplo de áreas amenizam significativamente esses impactos. Projetos híbridos bem dimensionados reduzem para menos de 10% a participação de geradores diesel na energia anual.

A exploração de soluções apropriadas para a GD em áreas urbanas e em áreas rurais de sistemas isolados abre uma grande oportunidade para o desenvolvimento de tecnologia e de produtos. A sociabilização e a popularização do uso de microfuentes renováveis abrem um grande mercado, gerando cadeias de produtos e serviços, produzindo emprego e renda. Estas cadeias tendem a crescer com o tempo, tendo em vista o potencial do mercado brasileiro.

As respostas às métricas de produção e estrutura de CT&I apontam que a produção em ciência, tecnologia e inovação em torno da macrotemática já apresenta uma derivada positiva, sendo mais intensa internacionalmente.

A estrutura de CT&I deve acompanhar esse comportamento, com o surgimento de laboratórios mais especializados e a formação de recursos humanos que posteriormente serão a base de novas empresas inovadoras e ICTs. Para lidar com a variedade de tecnologias e fontes de energia, a formação de redes colaborativas deve acontecer, ainda que não em grande escala. As características das fontes energéticas são diferentes e as tecnologia devem ser orientadas para a exploração adequada de cada uma, por exemplo, no caso de geradores híbridos, os componentes têm características distintas, cada um demandando conhecimento específico. Os trabalhos em coautoria deverão aumentar gradativamente, até atingir um patamar de estabilidade.

No contexto da indústria e mercado, as respostas às métricas mostram que o mercado tem uma demanda reprimida (sistemas isolados) e uma demanda em expansão, relacionada com as redes inteligentes. As microrredes estão estruturadas sob GDs, constituindo-se em componentes necessários para alcançar o paradigma das *smart grids*.

12.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordados os *roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia, os *roadmaps* dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associada aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Os gráficos de evolução da maturidade das rotas levam em conta: i) as linhas de pesquisas com maior influência sobre o desenvolvimento ou a otimização das tecnologias presentes nas rotas; e ii) os fatores portadores de futuro que suportam essa evolução.

Portanto, para cada temática serão apresentadas as linhas de pesquisa consideradas na caracterização da maturidade das suas rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

12.3.1. Temática sistemas isolados

Roadmap tecnológico

Para a construção dos *roadmaps* da rota geração concentrada, foram consideradas as linhas de pesquisa de maior influência sobre a sua evolução, consideradas as respectivas sub-rotas.



Rota - Geração concentrada - potencialidades energéticas

A caracterização das potencialidades energéticas em sistemas isolados tem importância mais acentuada nos dois primeiros períodos de análise, por ser esta rota uma condicionante para as outras. Atrrelados às dificuldades de acesso às áreas/comunidades que seriam alvo desta temática estão os custos associados para desenvolver atividades na rota. Daí a necessidade de investir recursos em P&D para desenvolver metodologias compactas e econômicas que viabilizem esses estudos, incluindo a identificação de complementariedades de fontes que forneçam indicativos do *mix* de fontes a explorar. A existência de estudos de potencial localizado pode vir a auxiliar o planejamento, assim como antecipar discussões no âmbito da regulação e também ambiental. É importante observar a interdependência positiva com outras macrotemáticas, contribuindo positivamente para a rota. Ver Gráfico 99.

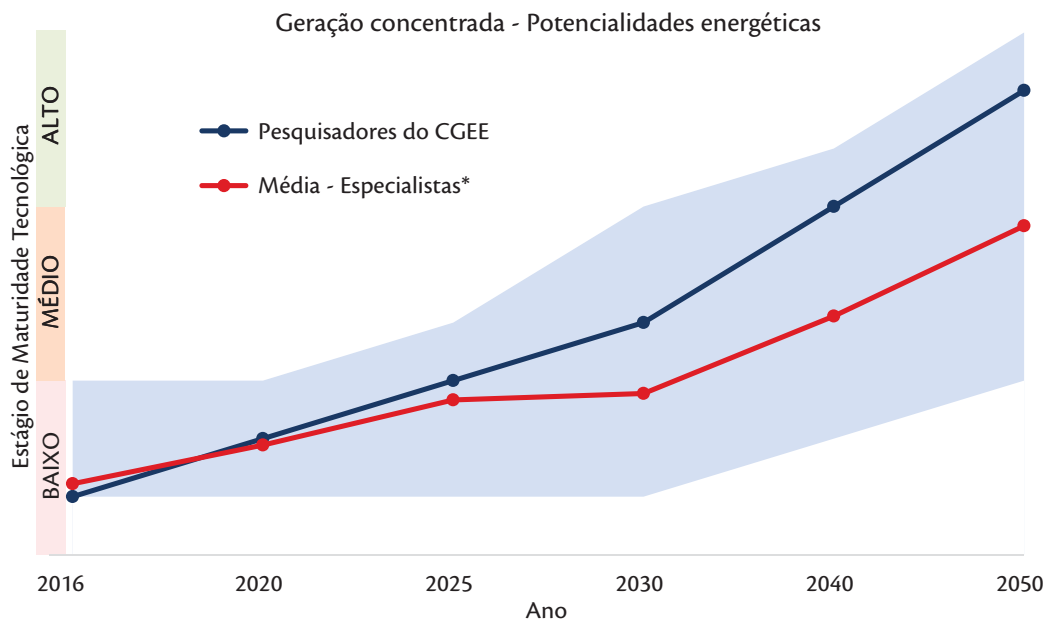


Gráfico 99 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Concentrada - Potencialidades Energéticas

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Geração concentrada - composição dos sistemas de geração

A configuração depende das fontes disponíveis e define a tecnologia a ser utilizada. A rota é fortemente influenciada pelas unidades de conversão de energia, que em lugares isolados são tipicamente geradores FV e geradores eólicos, ambos combinados às vezes com a participação de geração a diesel e com o sistema de armazenamento de energia. Outras fontes de energia como o biogás ou a biomassa também são possíveis, entretanto dependem da região. Além dos geradores, para compatibilizar a intermitência das fontes primitivas são necessários os conversores eletrônicos acompanhados de equipamentos auxiliares, de forma a gerar energia elétrica nos padrões oficiais (tensão senoidal, frequência constante). A rota é influenciada pelos preços da cadeia de produtos da composição, que devem cair com o aumento da demanda. Em termos de painéis FV, isto já está acontecendo. Entretanto, dispositivos de armazenamento apresentam uma curva mais lenta que extrapola o primeiro período de estudo. A participação nacional na produção nacional deve aumentar nos próximos anos, até esbarrar no custo de alguns insumos importados que, por economia de escala, dificilmente serão nacionalizados. Logo, importantes esforços em P&D devem ser investidos nesta rota para tornar esses produtos mais eficientes e competitivos. Importantes aspectos que influenciam a velocidade de evolução desta rota são a regulamentação e a legislação ambiental. A primeira deve ser modernizada e a segunda, flexibilizada para permitir o desenvolvimento deste tipo de soluções. Ver Gráfico 100.

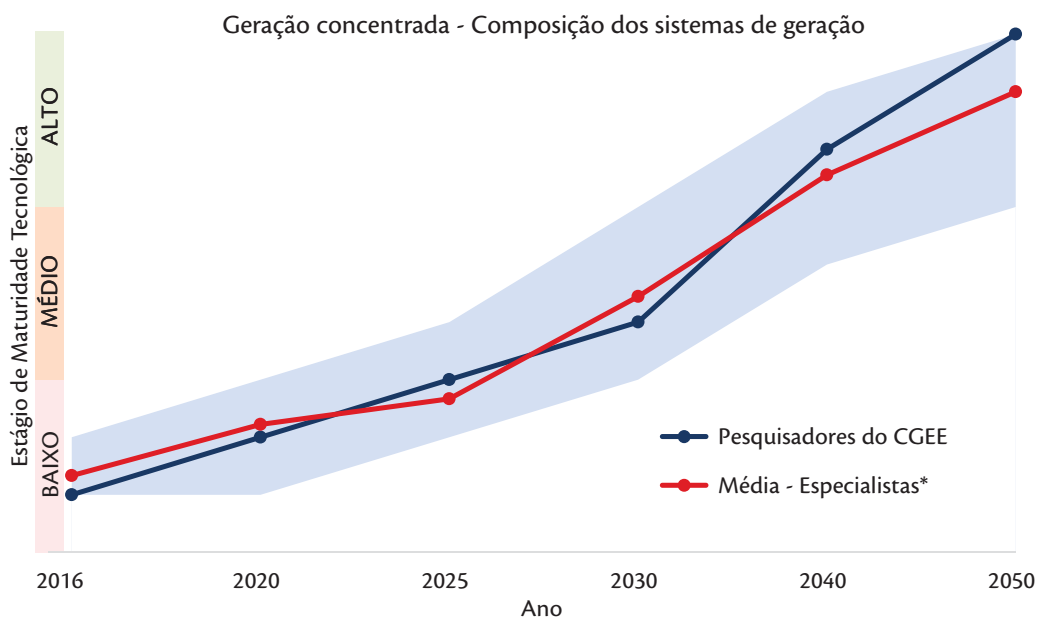


Gráfico 100 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Concentrada - Composição dos Sistemas de Geração

Fonte: Elaboração própria.



Rota - Geração concentrada - gestão dos sistemas de geração

A opção pelo uso de uma configuração concentrada de geração decorre do grau de distribuição e de disponibilidade das fontes, de restrições físicas e ambientais, custos etc. O desenvolvimento de ferramentas de monitoramento, de controle e de automação ganha um rol de destaque pelo isolamento e pela dificuldade deste tipo de situação. Esforços em P&D devem ser despendidos para elaborar soluções robustas. O uso intensivo de novas tecnologias em *software/hardware*, com melhorias constantes na robustez e na flexibilidade de aplicação, deve acontecer no primeiro e no segundo períodos de estudo. Para esta rota, o *hardware* e o *software* devem estar adaptados para a operação em condições adversas, incorporando inteligência e redundância para a operação autônoma. Ver Gráfico 101.

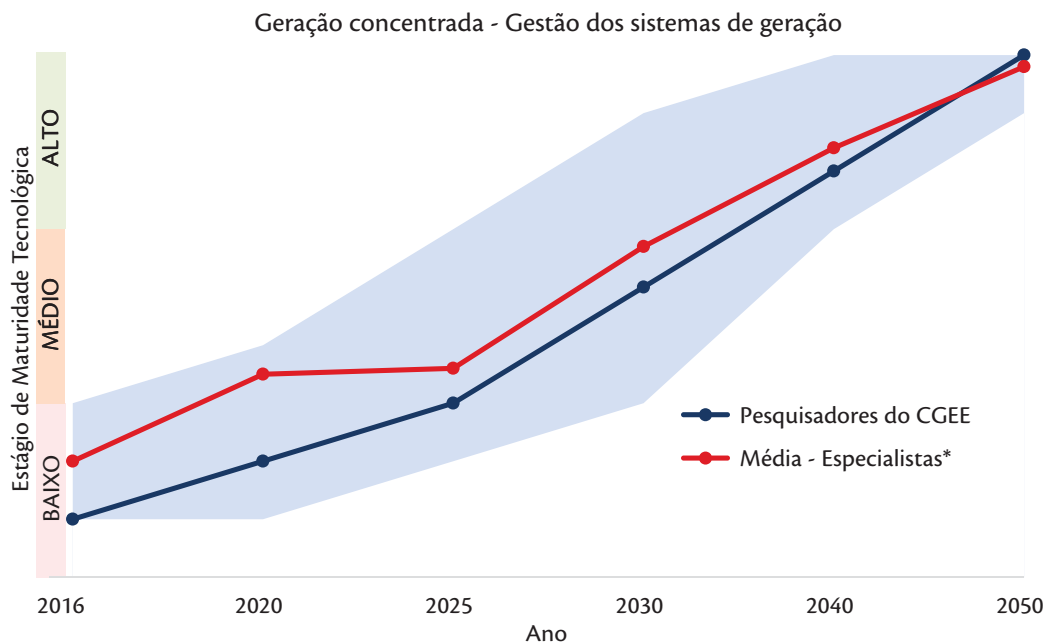


Gráfico 101 -Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Concentrada - Gestão dos Sistemas de Geração

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 56.

**Tabela 56 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas
Geração Concentrada - Potencialidades Energéticas - Composição
dos Sistemas de Geração - Gestão dos Sistemas de Geração**

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Sistemas isolados	Geração concentrada - Potencialidades energéticas	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I, Desenvolvimento de métodos e tecnologias para a caracterização dos recursos energéticos locais	Caracterização das fontes energéticas e caracterização dos sistemas de conversão de energia e de armazenamento de energia	Caracterização das fontes energéticas e caracterização dos sistemas de conversão de energia e de armazenamento de energia	Estudos avançados sobre sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Estudos avançados sobre sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Fomento e manutenção contínuos da caracterização das fontes
		Maturidade		BAIXO		MÉDIO		ALTO
		Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e desenvolvimento de tecnologias de geração adaptados aos sistemas isolados e aos insumos locais	Desenvolvimento de tecnologias de geração adaptados aos sistemas isolados e aos insumos locais	Desenvolvimento de tecnologias de integração entre fontes (caracterização dos sistemas híbridos de geração)	Tecnologias de O&M e monitoramento definidas e operantes	Métodos e tecnologias de implantação dos sistemas híbridos de geração em elevado nível de maturidade	Métodos e tecnologias de monitoramento dos sistemas híbridos de geração com foco na otimização contínua desses sistemas e fomento e manutenção contínuos de estudos sobre as tecnologias
		Maturidade		BAIXO		MÉDIO		ALTO
	Geração concentrada - gestão dos sistemas de geração	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e desenvolvimento de métodos e tecnologias para a caracterização dos recursos energéticos locais	Caracterização das fontes energéticas e suas particularidades e caracterização das tecnologias de sistemas de gestão	Caracterização das tecnologias de geração e entendimento das suas particularidades, quanto ao comportamento operativo e definição dos sistemas de gestão (sistemas híbridos)	Caracterização das tecnologias de geração e entendimento das suas particularidades, quanto ao comportamento operativo e definição dos sistemas de gestão (sistemas híbridos)	Métodos consolidados para a implantação, operação e manutenção dos sistemas híbridos de geração	Métodos e tecnologias de análise dos sistemas de gestão, com foco no desenvolvimento contínuo dessa tecnologia
		Maturidade		BAIXO		MÉDIO		ALTO
		Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e desenvolvimento de métodos e tecnologias para a caracterização dos recursos energéticos locais	Caracterização das fontes energéticas e suas particularidades e caracterização das tecnologias de sistemas de gestão	Caracterização das tecnologias de geração e entendimento das suas particularidades, quanto ao comportamento operativo e definição dos sistemas de gestão (sistemas híbridos)	Caracterização das tecnologias de geração e entendimento das suas particularidades, quanto ao comportamento operativo e definição dos sistemas de gestão (sistemas híbridos)	Métodos consolidados para a implantação, operação e manutenção dos sistemas híbridos de geração	Métodos e tecnologias de análise dos sistemas de gestão, com foco no desenvolvimento contínuo dessa tecnologia
		Maturidade		BAIXO		MÉDIO		ALTO

Fonte: Elaboração própria.



Rota - Geração descentralizada - potencialidades energéticas:

A caracterização das potencialidades energéticas em sistemas isolados tem importância mais acentuada nos dois primeiros períodos de análise, por ser esta rota uma condicionante para outras. Nesta rota, são classificados os casos cujas condicionantes físicas e geográficas projetam oportunidades energéticas localizadas em diferentes lugares. Por outro lado, estão presentes as dificuldades de acesso às áreas/comunidades que seriam alvo desta temática, implicando custos associados para desenvolver atividades nesta rota. Daí a necessidade de investir em P&D para desenvolver metodologias compactas e econômicas que viabilizem esses estudos, incluindo a identificação de complementariedades de fontes que forneçam indicativos do *mix* de fontes a explorar. Esta rota tem seu desenvolvimento principalmente nos dois primeiros períodos de planejamento e impacta diretamente as outras rotas. É importante observar a interdependência positiva com outras macrotemáticas, contribuindo positivamente para a rota. Ver Gráfico 102.

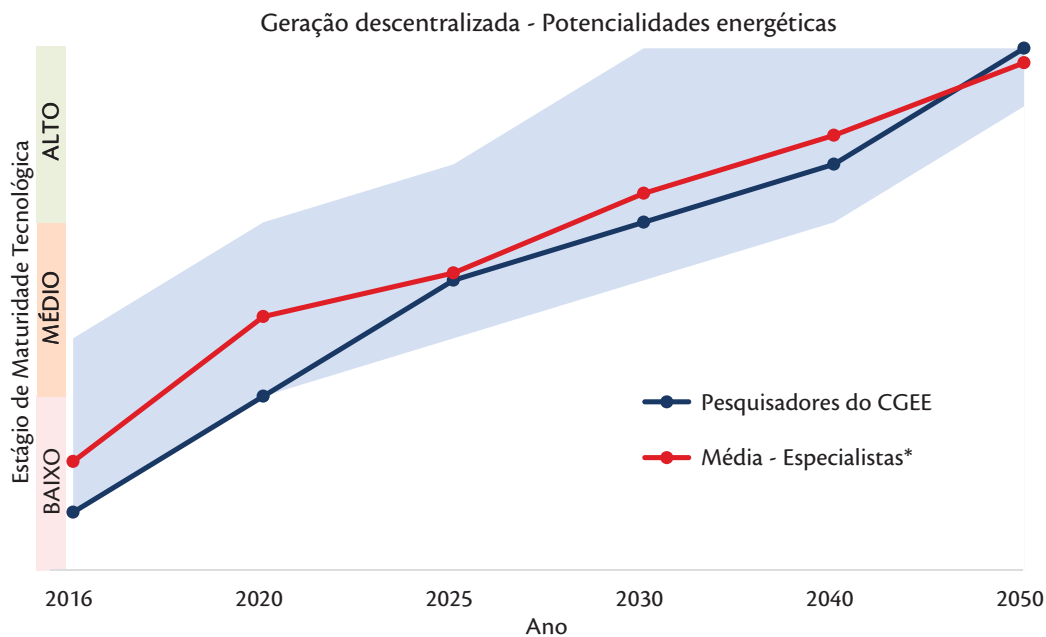


Gráfico 102 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Descentralizada - Potencialidades Energéticas

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Geração descentralizada - composição dos sistemas de geração:

A distribuição geográfica é imposta tanto pela disponibilidade das fontes, assim como das cargas. O *mix* da composição depende das fontes disponíveis e define a tecnologia a ser utilizada. A rota é fortemente influenciada pelas unidades de conversão de energia, que em lugares isolados são tipicamente geradores FV e eólicos, ambos combinados às vezes com a participação de geração a diesel e sistema de armazenamento de energia. Outras fontes de energia como o biogás ou a biomassa também são possíveis, entretanto, dependem da região. Além dos geradores, para compatibilizar a intermitência das fontes primitivas são necessários conversores eletrônicos acompanhados de equipamentos auxiliares, de forma a gerar energia elétrica nos padrões oficiais (tensão senoidal, frequência constante). Adicionalmente, para o balanço de potência, é necessário um dispositivo de armazenamento, tipicamente banco de baterias, que pode seguir também o modelo descentralizado, com vários bancos distribuídos pela rede. A rota é influenciada pelos preços da cadeia de produtos da composição (painéis FV, baterias, conversores, turbinas eólicas etc.), que devem cair com o aumento da demanda. Em termos de painéis FV, isto já está acontecendo. Entretanto, dispositivos de armazenamento apresentam uma curva mais lenta que extrapola o primeiro período de estudo. A participação nacional na produção nacional deve aumentar nos próximos anos até esbarrar no custo de alguns insumos importados que, por economia de escala, dificilmente serão nacionalizados. Logo, importantes esforços em P&D devem ser investidos nesta rota para tornar esses produtos mais eficientes e competitivos. Importantes aspectos que influenciam a velocidade de evolução desta rota são a regulamentação e a legislação ambiental. A primeira deve ser modernizada e a segunda, flexibilizada para permitir o desenvolvimento deste tipo de soluções. Ver Gráfico 103.

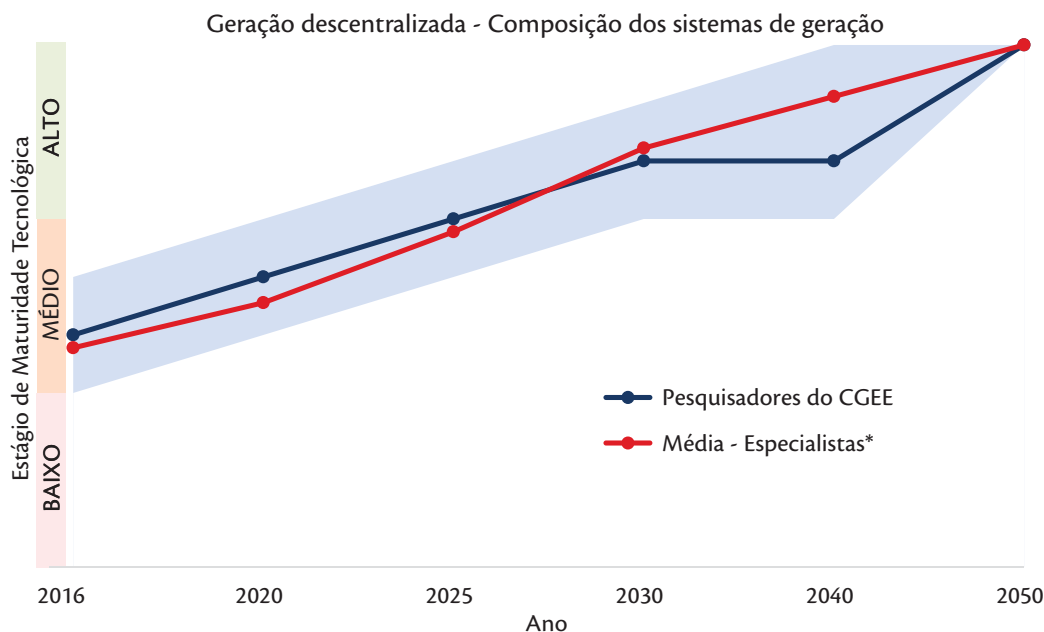


Gráfico 103 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Descentralizada - Composição dos Sistemas de Geração

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Geração descentralizada - gestão dos sistemas de geração

A escolha da configuração descentralizada de geração decorre do grau de distribuição e disponibilidade das fontes, de restrições físicas e ambientais, custos etc. Considerando-se que geradores (eólicos, FV, diesel, biomassa etc.) e dispositivos de armazenamento (ex.: banco de baterias) ficam distribuídos geograficamente na rede isolada, o desenvolvimento de ferramentas de monitoramento, de controle e de automação ganha um rol de destaque na operação confiável do sistema. Dado o isolamento e as dificuldades de acesso, as soluções devem ser robustas e tolerantes a falhas. Por esta razão, investimentos em P&D devem ser despendidos para elaborar soluções inovadoras. O uso intensivo de novas tecnologias em *software/hardware*, com melhorias constantes na robustez e na flexibilidade de aplicação, deve acontecer no primeiro e no segundo períodos de estudo. Para esta rota, o *hardware* e o *software* devem estar adaptados para operações em condições adversas, incorporando inteligência e redundância para a operação autônoma. Ver Gráfico 104.

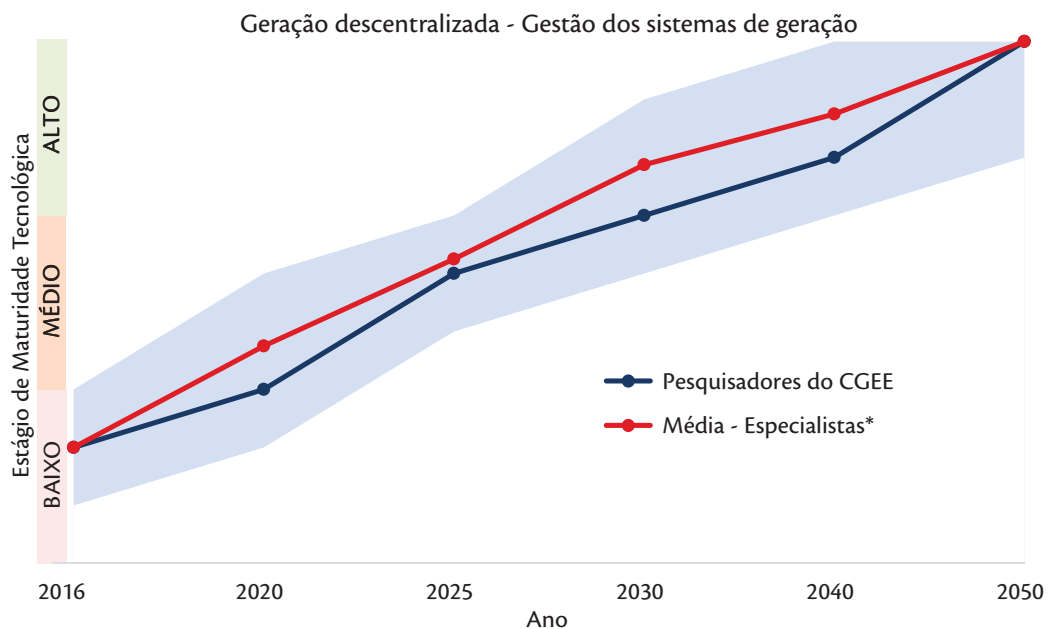


Gráfico 104 -Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Descentralizada - Gestão dos Sistemas de Geração

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 57.



Tabela 57 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Geração Desconcentrada - Potencialidades Energéticas - Composição dos Sistemas de Geração - Gestão dos Sistemas de Geração

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Sistemas isolados	Geração descentralizada - Potencialidades energéticas	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e desenvolvimento de métodos e tecnologias para a caracterização dos recursos energéticos locais. Desenvolvimento de tecnologias de geração adaptados aos sistemas isolados e aos insumos locais	Desenvolvimento de tecnologias de geração adaptados aos sistemas isolados e aos insumos locais	Desenvolvimento de tecnologias de integração entre fontes e sistemas de armazenamento de energia	Estudos avançados sobre sistemas de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Fomento e manutenção contínuos da caracterização das fontes	Fomento e manutenção contínuos da caracterização das fontes
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Geração descentralizada - Composição dos sistemas de geração	Fatores portadores de futuro	Tecnologias de geração adaptados aos sistemas isolados e aos insumos locais	Tecnologias de O&M e monitoramento definidas e operantes	Desenvolvimento de tecnologias de integração entre fontes e sistemas de armazenamento	Tecnologias de O&M e monitoramento definidas e operantes	Métodos e tecnologias de monitoramento dos sistemas de geração com foco na otimização contínua desses sistemas e fomento e manutenção contínuos de estudos sobre as tecnologias	Métodos e tecnologias de monitoramento dos sistemas de geração com foco na otimização contínua desses sistemas e fomento e manutenção contínuos de estudos sobre as tecnologias
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			
	Geração descentralizada - Gestão dos sistemas de geração	Fatores portadores de futuro	Caracterização das fontes energéticas e suas particularidades e caracterização das tecnologias de sistemas de gestão	Caracterização das tecnologias de geração e entendimento das suas particularidades, quanto ao comportamento operativo e definição dos sistemas de gestão	Caracterização das tecnologias de geração e entendimento das suas particularidades, quanto ao comportamento operativo e definição dos sistemas de gestão	Métodos consolidados para a implantação, operação e manutenção dos sistemas de geração	Métodos e tecnologias de análise dos sistemas de gestão, com foco no desenvolvimento contínuo dessa tecnologia	Fomento e manutenção contínuos de estudos sobre as tecnologias
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

12.3.2. Temática sistemas conectados ao SIN

Roadmap tecnológico

Para a construção dos *roadmaps* da rota geração concentrada foram consideradas as linhas de pesquisa de maior influência sobre a sua evolução e as respectivas sub-rotas.

Rota - Geração de auxílio à rede - potencialidades energéticas

A caracterização das potencialidades energéticas em regiões remotas é semelhante à caracterização observada nas sub-rotas geração concentrada e geração descentralizada de sistemas isolados. Há, portanto, a necessidade de investimentos em pesquisa e no desenvolvimento para o mapeamento e o beneficiamento dos recursos energéticos, incluindo a identificação de complementariedades de fontes que forneçam indicativos do *mix* de fontes a explorar. Ver Gráfico 105.

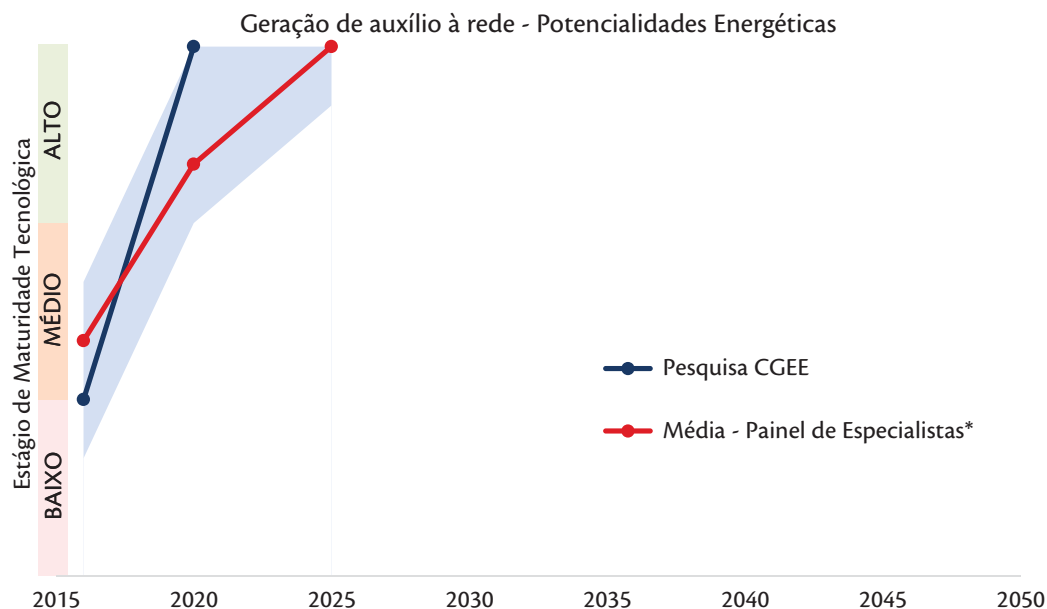


Gráfico 105 -Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração de Auxílio à Rede - Potencialidades Energéticas

Fonte: Elaboração própria.



Rota - Geração de auxílio à rede - composição dos sistemas de geração

A evolução da maturidade desta rota depende do desenvolvimento de sistemas de integração de fontes e de sistemas de integração das fontes de energia à rede local, e depende do desenvolvimento ou da otimização dos sistemas de operação e monitoramento. A P&D deve elevar a disponibilidade desses recursos tecnológicos e o acesso a eles, por meio da mitigação dos custos de produção e de implantação. Ver Gráfico 106.

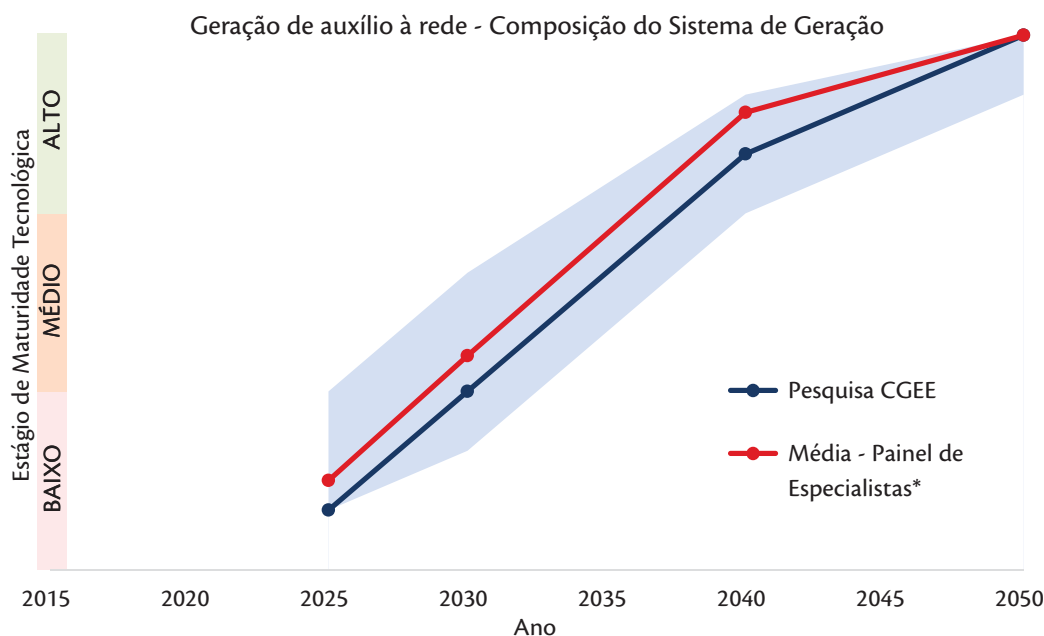


Gráfico 106 -Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração de Auxílio à Rede - Composição do Sistema de Geração

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Geração de auxílio à rede - gestão dos sistemas de geração

O desenvolvimento de ferramentas de monitoramento, controle e automação cumpre um papel fundamental na integração de GDs de diferentes características no SIN. Esforços em P&D devem ser despendidos para elaborar soluções robustas. O uso intensivo de novas tecnologias voltadas para *software/hardware*, com melhorias constantes na robustez e na flexibilidade de aplicação, deve acontecer no primeiro e segundo períodos de estudo. As capacidades dos sistemas de controle

devem possibilitar a operação resiliente (operação autônoma em ilhas, ditas microrredes) e integrada hierarquicamente ao SIN. Para esta rota, existem macrotemáticas convergentes, principalmente redes inteligentes de energia e sistemas de armazenamento, que contribuem positivamente para a sua evolução. Ver Gráfico 107.

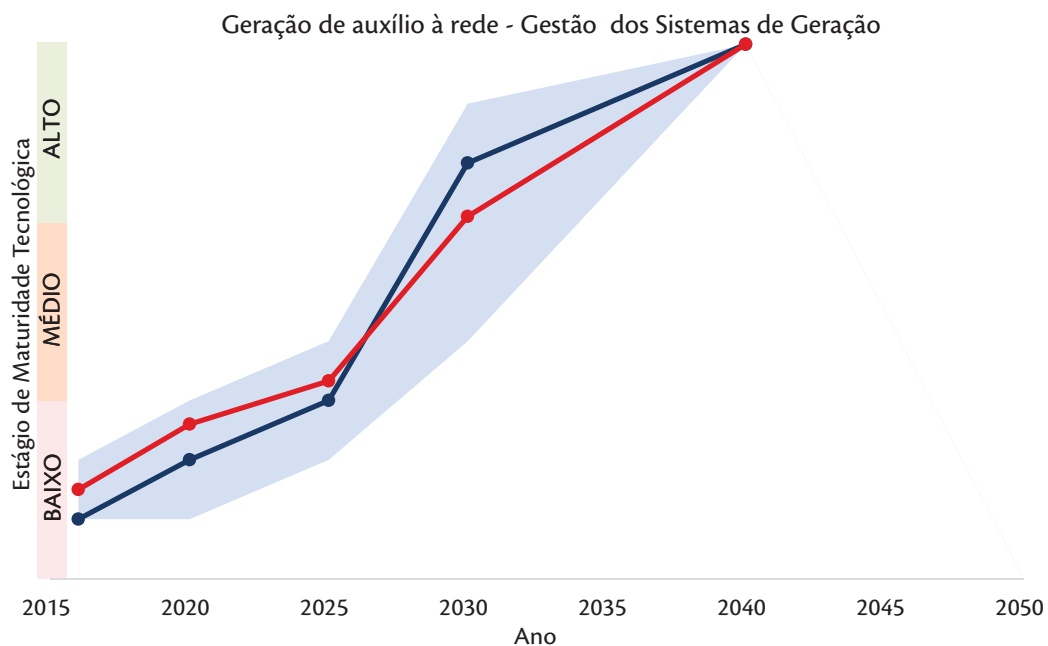


Gráfico 107 -Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração de Auxílio à Rede - Gestão dos Sistemas de Geração

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 58.



Tabela 58 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Geração de Auxílio à Rede - Potencialidades Energéticas - Composição dos Sistemas de Geração - Gestão dos Sistemas de Geração

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Sistemas conectados ao SIN	Geração de auxílio à rede - Potencialidades energéticas	Fatores portadores de futuro	Fomento ao desenvolvimento da CT&I e tecnologias avançadas para o mapeamento e caracterização dos insumos energéticos locais	Fomento à evolução contínua das tecnologias de mapeamento e caracterização dos insumos energéticos locais				
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			
	Geração de auxílio à rede - composição dos sistemas de geração	Fatores portadores de futuro	CT&I estruturada (RH e laboratórios). Estudos avançados sobre equipamentos de interligação entre sistemas de geração e rede e sobre sistemas de O&M e monitoramento	Protótipos laboratoriais sobre equipamentos de interligação entre sistemas de geração e rede e sobre sistemas de O&M e monitoramento e protótipos sobre sistemas de geração e cogeração para ligação à rede	Protótipos laboratoriais sobre equipamentos de interligação entre sistemas de geração e rede e sobre sistemas de O&M e monitoramento e protótipos sobre sistemas de geração e cogeração para ligação à rede	Protótipos em escala operacional sobre equipamentos de interligação entre sistemas de geração e rede e sobre sistemas de O&M e monitoramento e protótipos sobre sistemas de geração e cogeração para ligação à rede	Sistemas de cogeração e sistemas híbridos de auxílio à rede estruturados e em fase final de testes e mapeamento e caracterização dos insumos energéticos locais consolidados	Fomento ao desenvolvimento contínuo das tecnologias
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Geração de auxílio à rede - gestão dos sistemas de geração	Fatores portadores de futuro	CT&I estruturada (RH e laboratórios). Estudos sobre métodos de gestão de sistemas de geração e cogeração inteligidos à rede avançados.	Hardwares e softwares de gestão de sistemas de geração e cogeração inteligidos à rede tecnologicamente avançados.	Sistemas de geração e cogeração em desenvolvimento (fase protótipos)	Sistemas de geração e cogeração e sistemas de integração à rede estruturados em em testes operacionais	Fomento ao desenvolvimento contínuo dos sistemas de gestão	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

Rota - GD rural - potencialidades energéticas:

A caracterização das potencialidades energéticas em áreas rurais abre um leque de oportunidades para uma variedade de possibilidades de fontes energéticas ainda não adequadamente exploradas. No horizonte de análise, ela tem importância mais acentuada nos dois primeiros períodos por ser esta rota uma condicionante para outras. Devido à variedade de formas energéticas que podem acontecer, é relevante o investimento de recursos em P&D para desenvolver estratégias que permitam evidenciar essas oportunidades, incluindo a identificação de complementariedades de fontes que forneçam indicativos do *mix* a explorar. Esta rota deve ter um desenvolvimento mais acelerado nos dois primeiros períodos de planejamento para, em seguida, se estabilizar. Seu desenvolvimento impacta diretamente outras rotas. Ver Gráfico 108.

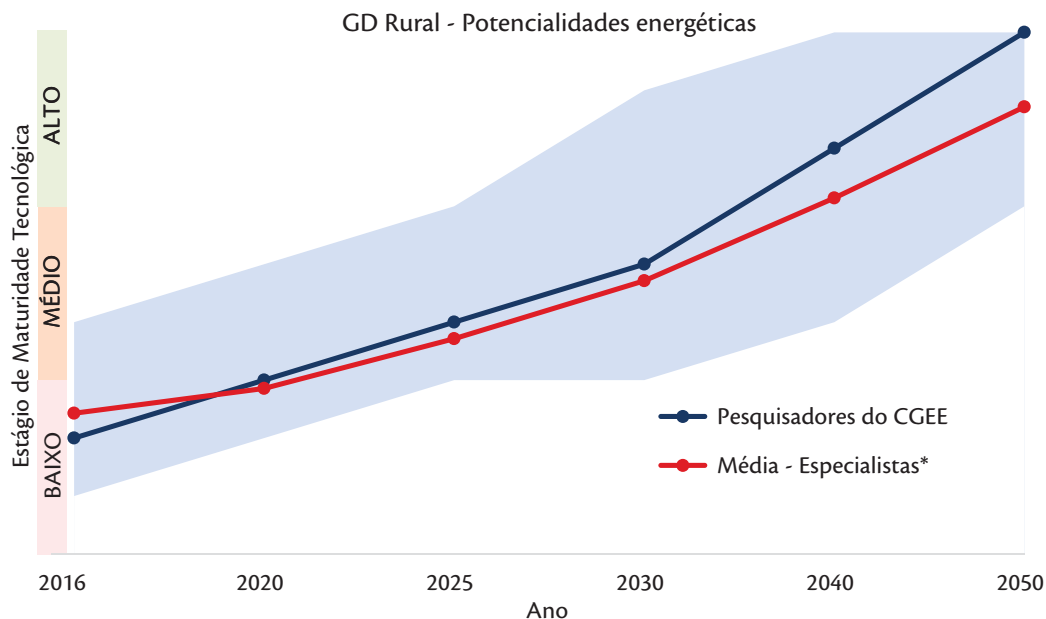


Gráfico 108 -Evolução da maturidade tecnológica da rota GD Rural - Potencialidades Energéticas

Fonte: Elaboração própria.

Rota - GD rural - composição dos sistemas de geração

Esta rota diz respeito à proposta de soluções tecnológicas para a geração descentralizada/distribuída em áreas rurais utilizando uma ou mais fontes de energia. O *mix* da composição depende das fontes



disponíveis e define a tecnologia a ser utilizada (biomassa, biogás, FV, aproveitamentos hidrocinéticos etc.). A rota é fortemente influenciada pelo tipo de unidade de conversão de energia, que depende do tipo de fonte a ser explorada, dando espaço a uma variedade de linhas de P&D. A exploração de várias fontes na forma de sistemas híbridos interligados à rede elétrica rural se apresenta como uma boa oportunidade para melhorar a qualidade do serviço e, dependendo da economia de escala, viabilizar a participação como produtor independente no SIN. Para viabilizar a capacidade de resiliência para consumidores rurais, devem ser incorporados a geração a diesel (ou outro tipo de geração despachável) e os sistemas de armazenamento de energia, impactando nos custos O&M do projeto. A cadeia tecnológica para a GD rural envolve também conversores eletrônicos para compatibilizar a intermitência (níveis de tensão, frequência e potência) das fontes primitivas e permitir a sua interligação na rede. A rota sofre a influência dos preços da cadeia de produtos da composição, que devem cair com o aumento da demanda. Em termos de painéis FV, os custos já apresentam uma tendência decrescente. Entretanto, dispositivos de armazenamento apresentam uma curva mais lenta que extrapola o primeiro período de estudo. A participação nacional na produção nacional deve aumentar nos próximos anos até esbarrar no custo de alguns insumos importados que, por economia de escala, dificilmente serão nacionalizados. Logo, importantes esforços em P&D devem ser investidos nesta rota para tornar esses produtos mais eficientes e competitivos. A evolução desta rota é fortemente influenciada pela regulamentação do setor e pela legislação ambiental. A primeira deve ser modernizada para viabilizar este tipo de GD descentralizada e a segunda, flexibilizada para permitir o desenvolvimento deste tipo de soluções em larga escala, favorecendo a oferta descentralizada de energia. Ver Gráfico 109.

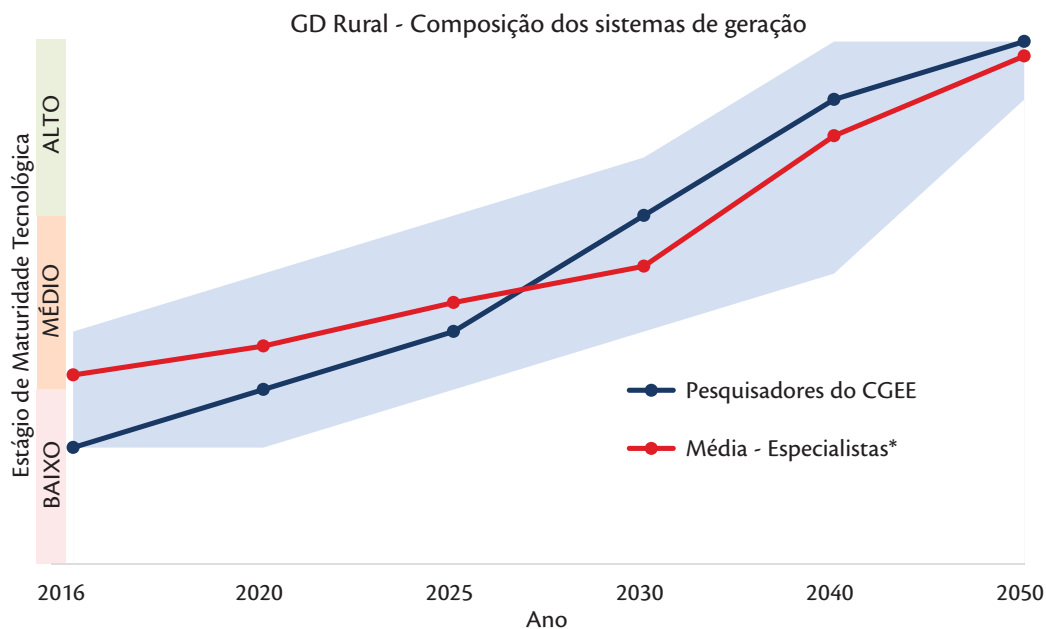


Gráfico 109 -Evolução da maturidade tecnológica da rota GD Rural - Composição dos Sistemas de Geração

Fonte: Elaboração própria.

Rota - GD rural - gestão dos sistemas de geração

A gestão de sistemas de geração distribuída rural apresenta uma série de desafios, primeiramente, pela natureza diversificada das fontes a serem exploradas; em segundo lugar, por estarem em área rural (final de linha) e serem interligados via redes fracas. Para uma operação interligada adequada, é necessário o desenvolvimento de ferramentas de monitoramento, de controle e de automação que viabilizem uma operação confiável e segura do sistema. Para tornar a operação segura, as soluções de controle e de automação devem ser robustas e tolerantes a falhas. Esta rota abre uma oportunidade para a formulação de soluções inovadoras em toda a sua cadeia, demandando que investimentos em P&D sejam despendidos para este tipo de geração de energia elétrica. O uso intensivo de novas tecnologias em *software/hardware*, com melhorias constantes na robustez e na flexibilidade de aplicação, deve acontecer no primeiro e no segundo períodos de estudo. Para esta rota, o *hardware* e o *software* devem ser aperfeiçoados, com o aumento da participação nacional, de forma a reduzir custos, incorporando inteligência e redundância para a operação autônoma. Ver Gráfico 110.

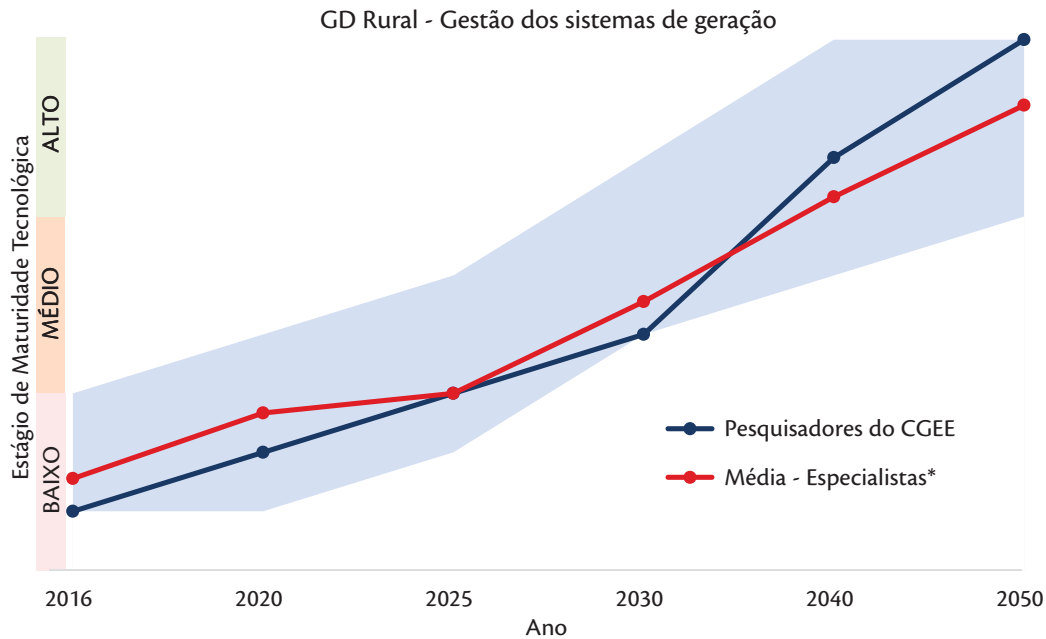


Gráfico 110 -Evolução da maturidade tecnológica da rota GD Rural - Gestão dos Sistemas de Geração

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 59.

Tabela 59 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas GD Rural - Potencialidades Energéticas - Composição dos Sistemas de Geração - Gestão dos Sistemas de Geração

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática - Sistemas conectados ao SIN	GD rural - Potencialidades energéticas	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I, Desenvolvimento de métodos e tecnologias para a caracterização dos recursos energéticos locais	Caracterização das fontes energéticas e caracterização dos sistemas de conversão de energia e de armazenamento de energia	Desenvolvimento de tecnologias para a geração de novos combustíveis a partir dos recursos locais	Estudos avançados sobre sistemas de integração entre fontes, sistemas de armazenamento e cogeração	Estudos avançados sobre sistemas de integração entre fontes, sistemas de armazenamento e cogeração	Fomento e manutenção contínuos da caracterização das fontes e do desenvolvimento de novos combustíveis
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	GD rural - Composição dos sistemas de geração	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e desenvolvimento de tecnologias de geração adaptados aos sistemas isolados e aos insumos locais	Desenvolvimento de tecnologias de geração adaptados aos sistemas isolados e aos insumos locais	Estudos avançados sobre sistemas de integração entre fontes, sistemas de armazenamento e cogeração	Estudos avançados sobre sistemas de integração entre fontes, sistemas de armazenamento e cogeração	Protótipo de sistemas de integração entre fontes, sistemas de armazenamento e cogeração para estudos em regime de operação real	Fomento e manutenção contínuos dos estudos para o desenvolvimento dos sistemas de geração e para a caracterização das fontes de energia e de novas fontes (novos combustíveis)
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	GD rural - Gestão dos sistemas de geração	Fatores portadores de futuro	Fomento à CT&I e desenvolvimento de métodos e tecnologias para a caracterização dos recursos energéticos locais	Caracterização das fontes energéticas e suas particularidades e caracterização das tecnologias de sistemas de gestão	Caracterização das tecnologias de geração e entendimento das suas particularidades, quanto ao comportamento operativo e definição dos sistemas de gestão	Caracterização das tecnologias de geração e entendimento das suas particularidades, quanto ao comportamento operativo e definição dos sistemas de gestão	Métodos consolidados para a implantação, operação e manutenção dos sistemas de geração e protótipo em escala de operação real para estudos	Métodos e tecnologias de análise dos sistemas de gestão, com foco no desenvolvimento contínuo dessa tecnologia
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.



12.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade das rotas tecnológicas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia, essa priorização é o resultado de um painel de especialistas e foram levados em conta a visão de futuro da macrotemática e os respectivos objetivos específicos, além de elementos facilitadores e limitadores observados nas respectivas tabelas de questões portadoras de futuro.

Para esta macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas, conforme apresentado na Tabela 60.

Tabela 60 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Potencialidades Energéticas	Sistemas Isolados/Geração Concentrada
2	Potencialidades Energéticas	Sistemas Isolados/Geração Descentralizada
3	Composição do Sistema de Geração	Sistemas Isolados/Geração Concentrada
4	Composição do Sistema de Geração	Sistemas Isolados/Geração Descentralizada
5	Gestão dos Sistemas de Geração	Sistemas Isolados/Geração Concentrada
6	Gestão dos Sistemas de Geração	Sistemas Isolados/Geração Descentralizada
7	Potencialidades Energéticas	SCS/GD Rural
8	Potencialidades Energéticas	SCS/Geração de Auxílio à Rede
9	Composição do Sistema de Geração	SCS/GD Rural
10	Composição do Sistema de Geração	SCS/Geração de Auxílio à Rede
11	Gestão dos Sistemas de Geração	SCS/GD Rural
12	Gestão dos Sistemas de Geração	SCS/Geração de Auxílio à Rede

Fonte: Elaboração própria.

A ordem de prioridades apresentada na Tabela 60 está fundamentada em critérios de precedência, estágio de maturidade de tecnologias, necessidade de estender o atendimento com energia elétrica para regiões isoladas e, por fim, na promoção da diversificação da matriz energética nos extremos do sistema interligado.

As primeiras rotas envolvem a caracterização das oportunidades energéticas em regiões isoladas, tarefa que demanda a disponibilidade de metodologias e de ferramentas eficientes. Logo, investimentos em P&D serão necessários para desenvolver, aperfeiçoar ou adaptar tecnologias para obter um mapeamento acurado e orientado quanto ao(s) tipo(s) de fonte(s) que se apresenta competitiva para as regiões remotas com demanda de energia elétrica.

A caracterização e o desenvolvimento de soluções de geração de energia para sistemas isolados, tanto na forma concentrada quanto na descentralizada, constituem a principal vertente de desafios tecnológicos a serem vencidos. As atividades de P&D associadas com estas rotas devem estar próximas no horizonte temporal em relação às rotas anteriores. De fato, não há pré-requisito rigoroso de sequência.

Em um segundo grupo de prioridades, encontram-se as rotas associadas à temática Sistemas Conectados ao SIN. Neste grupo, priorizam-se levemente as rotas vinculadas ao desenvolvimento da subtemática GD Rural, no entendimento de que os novos empreendimentos nessas áreas, por um lado, demandam energia, enquanto que, por outro, apresentam oportunidades energéticas que aliviam os investimentos em transmissão e distribuição. As oportunidades energéticas na área rural (por exemplo, biogás, resíduos sólidos, aproveitamentos heliotérmicos etc.) demandam uma variedade de tecnologias e de novas soluções criativas, abrindo espaço para inovações tecnológicas.



Referências



Referências bibliográficas

AEA TECHNOLOGY AND POYRY ENERGY CONSULTING FOR THE SCOTTISH EXECUTIVE. **Additional support for marine electricity generation in Scotland**. v.1 - Summary Report ED02360. Glengarnock, Scotland, oct. 2006. 66 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL; AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP. **Atlas de energia elétrica no Brasil**. 2 ed. Brasília, 2005. < Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

_____. **Banco de informações de geração**. 2017b. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

_____. **Procedimentos do programa de pesquisa e desenvolvimento - PROP&D - Módulo 2 - Diretrizes Básicas**. Disponível em:<<http://www.aneel.gov.br/programa-de-p-d>>. Acesso em: 28 fev. 2017.

_____. **Resultados da audiência pública da ANEEL nº 026/2015**. 2015. Disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2015687_1.pdf>.

_____. **Unidades consumidoras com geração distribuída**. 2017a. Disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/GD_Fonte.asp>. Acesso em: 01 mai. 2017.

ARENT, D., SULLIVAN, P., HEIMILLER, D., LOPEZ, A., EUREK, K., BADGER, J., JØRGENSEN, H.E., CLARKE, L., LUCKOW, P. **Improved off-shore wind resource assessment in global climate stabilization scenarios**. Technical report of National Renewable Energy laboratory (NREL) of United States, NREL/TP-6A20-55049, Oct. 2012.

AUGUSTINE, C.; BAIN, R.; CHAPMAN, J.; DENHOLM, P.; DRURY, E.; HALL, D.G.; LANTZ, E.; MARGOLIS, R.; THRESHER, R.; SANDOR, D.; BISHOP, N.A.; BROWN, S.R.; CADA, G.F.; FELKER, F.; FERNANDEZ, S.J.; GOODRICH, A.C.; HAGERMAN, G.; HEATH, G.; O'NEIL, S.; PAQUETTE, J.; TEGEN, S.; YOUNG, K. **Renewable electricity generation and storage technologies**. v. 2. of Renewable Electricity Futures Study. NREL/TP-6A20-52409-2. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. 2012. Disponível em: < <http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/52409-2.pdf>>.

BARBER, N.F.; URSELL, F. The generation and propagation of ocean waves 530 and swell. I. Wave periods and velocities. **Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, v. 240, n. 824, p.527. 1948.

BRASIL. LEI No 6.189, de 16 de dezembro de 1974. Altera a Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, e a Lei nº 5.740, de 1 de dezembro de 1971, que criaram, respectivamente, a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN e a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear - CBTN, que passa a denominar-se

Empresas Nucleares Brasileiras Sociedade Anônima - NUCLEBRÁS, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6189.htm>. Acesso em: 20 jan. 2017

_____. **Lei 9.991/2000**. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9991.htm>. Acesso em: 13 fev. 2017

_____. Ministério das Minas e Energia - MME. Projeto ônibus brasileiro a hidrogênio. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/onibus_hidrogenio/menu/projeto/quem_smos.html>

BSW SOLAR, **Indústria solar alemã**. 2016. Disponível em: <<https://www.solarwirtschaft.de/start/pressemeldungen.html>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

CARBON TRUST UK, **Europe and global tidal stream energy resource assessment**. 107799/D/ 2100/05/1. London, UK: Carbon Trust Marine Energy Challenge, 2004.

_____. **Technology innovation needs assessment marine energy: summary report**. Aug. 2012. Disponível em: <<http://www.carbontrust.com/media/168547/tina-marine-energy-summary-report.pdf>>.

CARNEIRO, P.; FERRARI, L.; AMARAL, J. Audiência Pública para atendimento ao disposto no Artigo 39 da Lei 8.666/93. **Unidade de Armazenamento Complementar a Seco de Combustíveis Irrradiados - UAS**. Apresentação em Power-point. Rio de Janeiro, 24 ago. 2016. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/LinkClick.aspx?fileticket=KqWSVlrhDZA%3D&tabid=40>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

CENTRO DE GESTÃO DES ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Estudo da cadeia de suprimento do Programa Nuclear Brasileiro (Relatório Parcial)**. Brasília: 2010. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/acnen/pnb/Rel-Parcial-CicloCombustivel.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

_____. **Hidrogênio energético no Brasil**. Subsídios para políticas de competitividade: 2010-2025, 2010. 72p.

_____. Programa Brasileiro de Célula a Combustível. Disponível em: <<https://finep.gov.br/images/a-finep/fontes-de-orcamento/fundos-setoriais/ct-energ/programa-brasileiro-de-celulas-a-combustivel.pdf>>

CEZ GROUP; EDF; EDF Energy; ENDESA; Enel; ENERGOATOM; Fortum; GDF; SUEZ/ Tractebel Engineering; GEN energija; IBERDROLA; MVM; NRG; ROSENERGOATOM; swissnuclear; TVO; Vattenfall; VGB Power Tech. **European utility requirements for LWR nuclear power plants**. Disponível em: <<http://www.europeanutilityrequirements.org>>. Acesso em: 04 abr. 2017

CHARLIER, R.H.; JUSTUS, J.R. **Ocean energies: environmental, economic and technological aspects of alternative power sources**. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Oceanography Series. 1993.

CLAUDE G Power from the tropical seas. **Mechanical Engineering** v. 52, n. 12/19, p.1039-1044.1930.



COLMENAR-SANTOS, A.; PERERA-PEREZ, J.; BORGE-DIEZ, D.; DEPALACIO-RODRÍGUEZ, C.; **Off-shore wind energy**: A review of the current status, challenges and future development in Spain. Elsevier: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016.

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. **Relatório de gestão do exercício de 2014**. Disponível em: <http://www.cnem.gov.br/images/cnen/documentos/acesso_a_informacao/rel-gestao-2014.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2017.

COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES - CEC. **Wave energy project results: the exploitation of tidal marine currents**. - DGXII - Report EUR16683EN. Brussels, Belgium: 1996.

_____. **Promotion of new energy sources in the Zhejiang province, China**, Final Report. - DGXVII - Program SYNERGY Contract N° 4.1041/D/97-09. Brussels, Belgium: 1998.

CORNETT, A.M. **Inventory of Canada's marine renewable energy resources**. Ottawa, Ontario, Canada: Canadian Hydraulics Centre, 2006.

DALLE, H.M.; DE MATTOS, J.R.L.; DIAS, M.S. Enriched gadolinium burnable poison for pwr fuel monte carlo burnup simulations of reactivity. In: MESQUITA, A.Z. (Org.). **Enriched gadolinium burnable poison for PWR fuel? Monte Carlo Burnup Simulations of Reactivity**. 1 ed. Zagreb: InTechOpen, 2013, p. 73-89

DEPARTMENT OF ENERGY AND CLIMATE CHANGE - DECC. **DECC public attitudes tracker survey - Wave 9; Summary of headline findings**. 29 Apr, 2014. Disponível em: < www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/306898/summary_of_key_findings_wave_9.pdf>.

Dias, M.S.; Mattos, J.R.L.d. Nuclear option for a higher sustainable economic growth. In: International Nuclear Atlantic Conference, 2007. ABEN. **Anais...** Santos: ABEN, 2007

DREW, B.; PLUMMER, A.R.; SAHINKAYA, M.N. **A review of wave energy converter technology**. Bath, UK.: University of Bath, Department of Mechanical Engineering, 16 Jun. 2009.

EFDA. **Fusion electricity: A roadmap to the realisation of fusion energy**. Nov. 2012. Disponível em: <<https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>>. Acesso em: Janeiro 2017

Electric Power Research Institute - EPRI. **EPRI utility requirement document URD**. Disponível em: <<https://www.epri.com/#/pages/product/0000000001018397/>>

ENERGY RESEARCH KNOWLEDGE CENTRE - ERKC. SET-Plan Information System SETIS. **Project from the European energy research web portal**. Disponível em: <<https://setis.ec.europa.eu/energy-research/research-themes>>.

_____. **Energy Storage**: Thematic research summary.2014. 86 p.Disponível em: < https://setis.ec.europa.eu/energy-research/sites/default/files/library/ERKC_%20TRS_Storage.pdf>.

ESTEFEN, S.F.; CASTELLO, X.; LOURENÇO, M.I.; ROSSETTO, R.M. Design analysis applied to a hyperbaric wave energy converter. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PRACTICAL DESIGN OF SHIPS AND OTHER FLOATING STRUCTURES, 11th Rio de Janeiro, Brazil, 19-24 Sep. 2010. **Proceedings...** Rio de Janeiro, RJ: 2010.

ESTEFEN, S.F.; GARCIA-ROSA, P.B.; BESERRA, E.R.; COSTA, P.R.; PINHEIRO, M.M.; LOURENÇO, M.I.; MACHADO, I.R.; MAES, S. Small scale models, prototype and control strategies. In: CONFERENCE ON OFF-SHORE, MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2012.

ESTEVEZ, R. Programa estratégico da INB. In: ENCONTRO NACIONAL: A Indústria e o Programa Nuclear Brasileiro, Palestra na Confederação Nacional da Indústria. **Apresentação em Power-point.** out. 2006.

EUROPEAN ASSOCIATION FOR STORAGE OF ENERGY - EASE; European Energy Research Alliance - EERA. **Recommendations for a European energy storage technology development roadmap towards 2030.** 72 p. Mar. 2013. Disponível em: <<http://www.eera-set.eu/wp-content/uploads/148885-EASE-recommendations-Roadmap-04.pdf>>.

European Commission. **Fusion electricity: A roadmap to the realisation of fusion energy.** nov. 2012. Disponível em: <<https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>>. Acesso em: jan. 2017.

EUROPEAN COMMISSION - EC; DG ENER. **The future role and challenges of energy storage.** DG Working Paper, 2013. 36 p. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/energy_storage.pdf>.

EUROPEAN ENVIRONMENTAL AGENCY - EEA. **Energy core set indicators.** Core Set Indicator 031-Renewable electricity consumption. nov. 2008a.

_____. **Europe's on-shore and off-shore wind energy potential, an assessment of environmental and economic constraints.** EEA technical report. 2009.

FALCÃO, A. The development of wave energy utilization: 2008 annual report. In: BRITO-MELO, A.; BHUYAN, G. (eds.), **International Energy Agency implementing agreement on ocean energy systems.** Lisboa, Portugal, p. 30-37. 2009.

FALCÃO, A.; TRAVASSOS, C.; MARQUES, N.; MARTINO, R. The shoreline OWC wave power plant at the Azores. In: EUROPEAN WAVE POWER CONFERENCE, 4th. Aalborg, Denmark, Dec. 2000, Paper B1. **Proceedings...** Aalborg, Denmark: 2000.

FALNES, J.; LILLEBEKKEN, P.M. Budal's latching-controlled-buoy type wave-power plant. In: EUROPEAN WAVE ENERGY CONFERENCE, 5th. 2003. **Proceeding...** 2003. p. 233-44.

FERNÁNDEZ, H. et al. Optimization of the wavecat wave energy converter. **Coastal Engineering Proceedings**, v. 1, n. 33, 2012. Disponível em: <<http://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view>>



/6443>.

FOTOVOLTAICAUFSC. **Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica**. 2017. (Nota Técnica).

FRAUNHOFER ISE, **Site**. 2016. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Caderno de energia nuclear**. Rio de Janeiro: FGV, 2016. (Série Cadernos FGV Energia). Disponível em: <http://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/pdf_fgv-energia_web.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2016.

THE GASIFICATION AND SYNGAS TECHNOLOGIES COUNCIL - GSTC. **Site**. Disponível em: <<http://www.gasification-syngas.org/>>.

GONÇALVES, J.S. Indústrias nucleares do Brasil: projeto de conversão. In: SEMANA DE ENGENHARIA NUCLEAR, 1., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro: ago. 2011. **Apresentação Power Point**. Rio de Janeiro: 2011. Disponível em: <http://www.nuclear.ufrj.br/semana2012/pdf/1_SEN_AGO_2011_final.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2017.

GRANDA, A. Produção de urânio na Mina de Caetité na Bahia será retomada. **AGÊNCIA BRASIL**: 21 jun. 2015. Disponível em: <<http://www.abc.com.br/noticias/2015/06/producao-de-uranio-da-mina-de-caetite-na-bahia-sera-retomada-em-2016>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

GUIMARÃES, L.S. Decommissioning Brazilian NPPs: policy, strategy and planning. In: WORLD NUCLEAR DECOMMISSIONING & WASTE MANAGEMENT CONGRESS (Europe) 2016. **Apresentação em Power-point**. Sept. 12-14/London. Disponível em: <http://www.academia.edu/28867562/DECOMMISSIONING_BRAZILIAN_NPPs_POLICY_STRATEGY_AND_PLANNING>. Acesso em: 30 jan. 2017

GUIMARÃES, L.S.; MATTOS, J.R.L. de. **Energia nuclear e sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010. (Série Sustentabilidade, 10).

HOLCOMB, D. E. Small, modular advanced high-temperature reactor—carbonate thermochemical cycle technology readiness level assessment. Oak Ridge:Nationa Laboratory.Oak Ridge, mar. 2014. Disponível em: <<http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub48701.pdf>>. Acesso em: 28 dez. 2016.

HUCKERBY, J.A.; JEFFREY, H.; MORAN, B. **An International vision for ocean energy**. Ocean Energy Systems Implementing Agreement. 2011. Disponível em: <http://www.oceanrenewable.com/wp-content/uploads/2011/05/oes_vision_brochure_2011.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2016.

Indústrias Nucleares do Brasil - ELETRONUCLEAR. **Como funciona uma usina nuclear?** Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/SaibaMais/Espa%C3%A7odoConhecimento/Pesquisaescolar/EnergiaNuclear.aspx>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

_____. **Guia Eletrobrás Eletronuclear de pronta resposta**. Abr. 2015. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequentes/EnergiaNuclearnoBrasil.aspx>>. Acesso em: 10 Jan. 2017

_____. **Pergunta Frequentes**. Jun. 2016. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/20024846-Perguntas-frequentes-inb.html>>. Acesso em: 02 jan. 2017.

Ingersoll, D.T.; Poore, W.P. **Reactor technology options study for near-term deployment of GNEP grid-appropriate reactors**. Tennessee: Oak Ridge National Laboratory. 2007. Disponível em: <<https://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub8015.pdf>>. Acesso em: dez. 2016.

International Atomic Energy Agency - IAEA. **Managing siting activities for nuclear power plants**. Vienna: 2012. (IAEA Nuclear Energy Series, No. NG-T-3.7). Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1565_web.pdf>. Acesso em: 20 set. 2014.

_____. **Nuclear power and sustainable development**. Vienna, 2016. Disponível em: <<http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1754web-26894285.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016

_____. **Nuclear power reactors in the world**. Vienna, 2016. Disponível em: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/RDS_2-36_web.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2016

_____. **Nuclear technology review 2016**, Vienna. Disponível em: <https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC60/GC60InfDocuments/English/gc60inf-2_en.pdf>. Acesso em: 24 out. 2016

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Technology roadmap: energy storage** 2014. 64 p. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technologyroadmap_energystorage.pdf>

_____, **Next generation wind and solar power - from cost to value**. 2016. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/next-generation-wind-and-solar-power.html>>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA; Nuclear Energy Agency - NEA **Technology roadmap: nuclear energy**, OECD/IEA/NEA, Paris. 2015. Disponível em: <https://www.iea.org/media/free_publications/technologyroadmaps/TechnologyRoadmapNuclearEnergy.pdf>. Acesso em: 24 out. 2016

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY IMPLEMENTING AGREEMENT ON OCEAN ENERGY SYSTEMS - IEA-OES. **Annual Report 2013**, Apr. 2014a, Disponível em: <http://www.ocean-energy-systems.org/news/2013_annual_report/>.

INTERNATIONAL PARTNERSHIP FOR HYDROGEN AND FUEL CELLS IN THE ECONOMY - IPHE. An International vision for hydrogen and fuel cells. Disponível em: <<http://www.iphe.net/>>.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. **Renewable energy technologies: Cost analysis series**. Concentrating Solar Power. Abu Dhabi: jun. 2012.

JAMES, V. **Marine renewable energy: a global review of the extent of marine renewable energy developments, the developing technologies and possible conservation implications for cetaceans**. Whale and dolphin conservation - WDC. Nov. 2013.



JOHNS, E.; WILSON, W.D.; MOLINARI, R.L. Direct observations of velocity and transport in the passages between the Intra-Americas Sea and the Atlantic Ocean, 1984-1996. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C11, p. 25805-25820.1999.

JOINT RESEARCH CENTRE - JRC. **Overview of European innovation activities in marine energy technology**, Scientific and Policy Reports, Report EUR 26342 EN, 2013. Disponível em: < <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/30325>>.

KEMPENER, R. AND NEUMANN, F. **Salinity gradient energy, technology brief**. International Renewable Energy Agency (IRENA) ocean energy technology brief 4, June, 2014.

_____. **Tidal energy, technology brief**. International Renewable Energy Agency (IRENA) ocean energy technology brief 3, June, 2014.

_____. **Wave energy, technology brief**. International Renewable Energy Agency (IRENA) ocean energy technology brief 4, June, 2014.

KERR, D. Marine energy. **Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series A Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 365, n. 1853, p. 971-992. 2007.

KHAN, J.; BHUYAN, G.S. **Ocean energy: global technology development status**. Lisboa, Portugal: Powertech Labs for the IEA-OES, Document To104, Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Ocean Energy Systems - OES-IA, 2009. Available at: <http://www.iea-oceans.org/_fi ch/6/ANNEX_1_Doc_To104.pdf>.

KHAN, J.; MOSHRE, A.; BHUYAN, G. **A Generic outline for dynamic modeling of ocean wave and tidal current energy conversion systems**. Piscataway, NJ, USA: Institute for Electrical and Electronic Engineering, 2009. 6 p.

KOBAYASHI, H.; JITSUHARA, S.; UEHARA, H. The present status and features of OTEC and recent aspects of thermal energy conversion technologies. In: MEETING OF THE UJNR MARINE FACILITIES PANEL, 24th. Honolulu, HI, USA, 4-12 November 2001. **Proceedings...** Honolulu, HI, USA: 2004. Available at: <http://www.nmri.go.jp/main/cooperation/ujnr/24ujnr_paper_jpn/Kobayashi.pdf>.

KREWITT, W.; NIENHAUS, K.; KLEßMANN, C.; CAPONE C.; STRICKER, E.; GRAUS, W.; HOOGWIJK, M.; SUPERSBERGER, N.; VON WINTERFELD, U.; SAMADI S. **Role and potential of renewable energy and energy efficiency for global energy supply**. Climate Change 18/2009, Federal Environment Agency, Dessau-Roßlau, Germany, 336 p. 2009.

LANG, F. The Rance tidal power plant: review of 40-years operation, environmental effects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN ENERGY, 2nd. Brest, France, 15-17 October 2008. **Proceedings...** Brest, France: 2008.

LEWIS, A.; ESTEFEN, S.F.; HUCKERBY, J.; LEE, K.S.; MUSIAL, W.; PONTES, T. et al. Ocean energy. In: EDENHOFER, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K.; MATSCHOSS, P.; KADNER, S. et al. (eds) **Renewable energy sources and climate change mitigation**: Special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. p. 497-534.

LIGHTHILL, J. **Waves in fluids**. Cambridge University Press. 1978.

LOEB, S.; NORMAN, R.S. Osmotic power plants. **Science**, v.189, n. 4203, p.654-655. 1975.

LOVEGROVE, K.; STEIN, W. **Concentrating solar power technology**: principles, developments and applications. Woodhead Publishing Limited, 2012.

LU, H.W. et al. A review on the development of tidal current energy in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1141- 1146. 2010.

MINERALS MANAGEMENT SERVICE - MMS. **Technology white paper on ocean current energy potential on the U.S. outer continental shelf**. Washington, DC, USA: Renewable Energy and Alternate Use Program, U.S Department of the Interior, 2006. Available at: <http://www.ocsenergy.anl.gov/documents/docs/OCS_EIS_WhitePaper_Current.pdf>.

MOFOR, L.; GOLDSMITH, J.; JONES, F. **Ocean energy; technology readiness, patents, deployment status and outlook**. Report of the International Renewable Energy Agency (IRENA), Aug. 2014.

MØRK, G.; BARSTOW, S.; KABUTH, A.; PONTES, M.T. Assessing the global wave energy potential. In: OMAE2010: 29th International Conference on Ocean, *Off-shore* Mechanics and Arctic Engineering: v. 3; 2010 Jun 6-11; Shanghai, China. **Proceedings...** New York: ASME Press. p. 447-54. 2010.

NATIONAL RENAWARE ENERGY IABORATORY - NREL, **Photovoltaic energy**. 2017. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/pv/>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

NIHOUS, G.C. A preliminary assessment of ocean thermal energy conversion resources. **J Energy Resour Technol**. v.129, n.1, p.10-7. 2007.

_____. Mapping available ocean thermal energy conversion resources around the main Hawaiian Islands with state-of-the-art tools. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, n. 2, p. 043104. 2010.

NIILER, P.P.; RICHARDSON, W.S. Seasonal variability of the Florida Current. **Journal of Marine Research**, n. 31, p. 144-167. 1973.

NORWEGIAN WATER RESOURCES AND ENERGY DIRETORATE (NVE). **Potential for off-shore wind energy production in Norway** (Vindkraftpotensialet utenfor norskekysten (*off-shore*)), Report n. 9, Norway 2008.

Nuclear Energy Institute. **Supply chain map nuclear reactor components**. Disponível em: <<https://www>>.



nei.org/Master-Document-Folder/Publications-and-Brochures/Brochures/Supply-Chain-Map-New-Nuclear-Components>. Acesso em: 20 jan. 2017

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT - OECD; Nuclear Energy Agency - NEA. **Uranium 2014: resources, production and demand**. Paris, 2014. Disponível em:<<https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2014/7209-uranium-2014.pdf>>. Acesso em: 08 mar. 2017

ORTIZ, G.P.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica *off-shore* na margem do Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas Especiais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 5., (V SOB), Santos, SP, 2011. **Anais...** Santos, SP: 2011. Disponível em: < http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2011/07.06.17.10/doc/Ortiz_Potencial.pdf>.

PAPAIANOANNOU, I. **Marine energy**: technology map of the european strategic technology plan (SET-Plan). Technology Descriptions Chapter 6, European Commission, JRC, Institute for Energy and Transport. 2011.

PELC, R.; FUJITA, R.M. Renewable energy from the ocean, **Marine Policy** n. 26, p. 471-479. 2002.

PÉREZ, C.; IGLESIAS, G. Integration of wave energy converters and *off-shore* windmills. In: THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN ENERGY ICOE 2012. Dublin, 2012. **Proceedings...** Dublin: 2012. Disponível em: http://www.icoe-conference.com/publication/integration_of_wave_energy_converters_and_off-shore_Windmills/>.

PERROTA, J.A. **Reator multipropósito Brasileiro**: um laboratório nacional de nêutrons para a comunidade de pesquisa em materiais. Sociedade Brasileira De Pesquisa De Materiais -SBPMat Disponível em: <<http://sbpmat.org.br/pt/reator-multiproposito-brasileiro-um-laboratorio-nacional-de-neutrons-para-a-comunidade-de-pesquisa-em-materiais/>>. Acesso em: jan. 2017.

PORTAL BRASIL. **Brasil possui a 5ª reserva de urânio no mundo**. Publicado: 20 set. 2016. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/09/brasil-possui-5-maior-reserva-de-uranio-no-mundo>>. Acesso em: 08 mar. 2017.

PUGH, D.T. **Tides, surges and mean-sea level**: a handbook for engineers and scientists. Chichester, UK: Wiley, 1987.

RAYE, R. **Characterization study of the Florida current at 26.11° north latitude, 79.50° west longitude for ocean current power generation**. Thesis (M.S.) - College of Engineering, Florida Atlantic University, Boca Raton, FL, USA. 2001.

REN21. **Renewables 2015**. Global Status Report. Steering Committee. Paris: 2015.

ROGNER, H.H.; BARTHEL, F.; CABRER, M.; FAAIJ, A.; GIROUX, M.; HALL, D. et al. Energy resources. In: United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs,

World Energy Council. **World energy assessment: energy and the challenge of sustainability**. New York: UNDP; p. 135-72. 2000.

SANDVIK, O.S. The Norwegian solution for blue energy: pressure retarded osmosis developments (PRO). In: LIENARD, F.; NEUMANN, F. (eds.), **Salinity gradient power in Europe: state of the art**, Sustainable energy week, Brussels, 13 April, 2011. Disponível em: <<http://salinitygradientpower.eu/wp-content/uploads/2011/08/workshop-report-EUSEW.pdf>>.

SHARIF, A.O. et al. The Potential of chemical-osmotic energy for renewable power generation. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS, 8-13 May. 2011, **Proceedings...** 2011. p. 2190-2197. Disponível em: <<http://www.ep.liu.se/ecp/057/vol9/ecp057vol9.pdf>>. Acesso em 07 jul. 2016.

SHAW, L.T. Study of tidal power projects in the UK, with the exception of the Severn barrage. **La Houille Blanche**, v. 52, n. 3, p. 57-65. 1997.

SIMS, R.E.H.; SCHOCK, R.N.; ADEGBULULGB, A.; FENHANN, J.; KONSTANTINAVICIUTE, I.; MOOMAW, W. et al. Energy supply. In: METZ, B.; DAVIDSON, O.R.; BOSCH, P.R.; DAVE, R.; MEYER, L.A. eds. **Climate change: mitigation of climate change**. New York: Cambridge University Press; p. 251-322. 2007.

SINDEN, G.E. **Renewable electricity generation: resource characteristics and implications of wind, wave and tidal stream power in the UK**. London, UK: Renewables Advisory Board, UK Department of Energy and Climate Change, 2007.

SKRÅMESTØ, Ø.S.; SKILHAGEN, S.E.; NIELSEN, W.K. Power production based on osmotic pressure. In: WATERPOWER 16, Jul 27-30, 2009. Spokane, WA, **Proceedings...** Spokane, WA, USA: 2009.

STEWART, H.B. Current from the current. **Oceanus**, n.18, p. 38-41. 1974.

SOLAR POWER EUROPE, 2016. **Global market outlook for solar power 2016-2020**. Disponível em: <<http://www.solarpowereurope.org/insights/global-market-outlook/>>.

SPV MARKET RESEARCH. **Solar pv market research, all solar all the time**. 2016. Disponível em: <<http://www.spvmarketresearch.com/>>. Acesso em: 18 jan. 2017.

STRATEGIC INITIATIVE FOR OCEAN ENERGY - SI Ocean. **Ocean energy: state of the art**, Dec. 2012. Disponível em: <http://si-ocean.eu/en/upload/docs/WP3/Technology%20Status%20Report_FV.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2016.

TRIEB, F.; SCHILLINGS, C.; O'SULLIVAN, M.; PREGGER, T.; HOYER-KLICK, C. Global potential of concentrating solar power. In: SOLAR PACES CONFERENCE. Berlin, 2009. **Proceedings...** Berlin, 2009.

UIHLEIN, A., AND MAGAGNA, D. Wave and tidal current energy - a review of the current state of research beyond technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier. v. 58, p.1070-1081. May, 2016.



UK DEPARTMENT OF TRADE AND INDUSTRY. **Atlas of UK marine renewable energy resources:** technical report. London, UK: 2004. Available at: <<http://www.renewables-atlas.info/>>. Acesso em: 07 jul. 2016.

The UK National Nuclear Laboratory. **Comparison of thorium and uranium fuel cycles.** 2012. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/65504/6300-comparison-fuel-cycles.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2016

US DOE. **Energy efficiency and renewable energy marine and hydrokinetic database.** Washington, DC, USA. 2010. Available at: <<http://www.eere.energy.gov/windandhydro/hydrokinetic/default.aspx>>.

U.S. Energy Information Administration. **INTERNATIONAL Energy outlook 2016.** Washington, DC. 2016. Disponível em <[http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf)>. Acesso em: 24 out. 2016.

U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. **Combined license applications for new reactors.** Disponível em: <<https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/col.html>>. Acesso em: 10 jan. 2017

USACHEV, I.N. The outlook for world tidal power development. **International Journal on Hydropower and Dams.** v. 15, n. 5, p. 100-105. 2008.

VAN DEN ENDE, K.; GROEMAN, F. **Blue Energy.** Arnhem, The Netherlands: Leonardo Energy, KEMA Consulting, 2007. Available at: <http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/161>. Acesso em: 07 jul. 2016.

VANZWIETEN, J.; DRISCOLL, F.R.; LEONESSA, A.; DEANE, G. Design of a prototype ocean current turbine-Part I: mathematical modeling and dynamics simulation. **Ocean Engineering,** v. 33, n. 11-12, p. 1485-1521. 2005.

VEGA, L.A. Ocean thermal energy conversion primer. **Marine Technology Society Journal,** v. 6, n. 4, Winter, p. 25-35. 2002.

_____. **Ocean thermal energy conversion:** encyclopedia of sustainability science and technology, Springer, p. 7296-7328, 2012. Disponível em: <<http://hinmrec.hnei.hawaii.edu/wpcontent/uploads/2010/01/OTEC-Summary-Aug-2012.pdf>>.

XU, X.; VIGNAROOBAN, K.; XU, B.; HSU, K.; KANNAN, A.M.. Prospects and problems of concentrating solar power technologies for power generation in the desert regions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** Elsevier. 2016

XU, Z., **Design strategies for optimizing high burn-up fuel in pressurized water reactors.** Thesis (Ph.D) - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2000.

WANG, C.; LU, W. **Analysis method and reserves estimation on ocean energy resources.** Beijing, China: Ocean Press. 2009.

WISER, R.; YANG, Z.; HAND, M.; HOHMEYER, O.; INFIELD, D. et al. Wind energy. In: Edenhofer, O.; PICHES-MADRUGA, R.; SOKONA, Y.; SEYBOTH, K.; MATSCHOSS, P.; KADNER, S. et al. eds. **Renewable energy sources and climate change mitigation**: Special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press; 2012. p. 535-608.

WORLD ENERGY COUNCIL **World energy assessment**. London, UK: World Energy Council, 2000.

_____. **World energy resources: solar**. 2016. Disponível em: < https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Solar_2016.pdf>.

World Nuclear Association. **Current and future generation**. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation.aspx>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

_____. **Improved performance from existing nuclear reactors**. Disponível em: < <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>>. Acesso em: 13 abr. 2017b.

_____. **Plant life extension and retirements**. 2017. Disponível em: < <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide.aspx>>. Acesso em: 13 abr. 2017a

_____. **Radioactive waste management**. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>>. Acesso em: 02 mar. 2017.

_____. **The World nuclear supply chain: outlook 2035**. England. September 2016.

Wübbeke, J.; Ting, G. **China's nuclear industry goes global**. The Diplomat, Berlim, Alemanha, 2016.

YANG, H.; HAAS, K.A.; FRITZ, H.M. Ocean current energy assessment for the gulf stream. In: ANNUAL MARINE RENEWABLE ENERGY TECHNICAL CONFERENCE, 4th. 30-31 October, 2012. Proceedings... 2012. Disponível em: < www.mrec.umassd.edu/media/supportingfiles/mrec/agendasandpresentations/4thconference/xiu_feng_yang.pdf >.

ZHANG, L.; SUN, K. **Tidal current energy developments in China**. Implementing Agreement for a Co-operative Programme on Ocean Energy Systems (OES-IA) Newsletter, May 2007, p. 2.



Anexo - Planilha de indicadores

Ver documento em formato digital disponível em <https://www.cgee.org.br/energia>.



Listas



Lista de Figuras

Figura 1 -	Conceitos de sistemas de sustentação de aerogeradores com DNA off-shore	48
Figura 2 -	Roadmap energia nuclear (fissão)	63
Figura 3 -	Processo da etapa de construção de futuro	70
Figura 4 -	Objetivos específicos por horizonte de análise	72
Figura 5 -	Categorização do mapa do conhecimento	73
Figura 6 -	Exemplo de mapa do conhecimento da macrotemática Supercondutores	76
Figura 7 -	Roadmap genérico para a conexão entre recursos para os objetivos	83
Figura 8 -	Exemplo do gráfico de evolução da maturidade tecnológica com a contribuição no painel de especialistas	88
Figura 9 -	Caracterização da macrotemática energia eólica (Preenchimento na cor verde; temáticas. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)	94
Figura 10 -	Caracterização da macrotemática Energia Solar Fotovoltaica (preenchimento na cor verde; temáticas; abaixo; rotas tecnológicas)	120
Figura 11 -	Cadeia produtiva da geração fotovoltaica com base no silício. As etapas de Componentes e Serviços são independentes do tipo de célula fotovoltaica e se aplicam da mesma forma aos filmes finos, células orgânicas etc.	124
Figura 12 -	Caracterização da macrotemática Energia Solar Heliotérmica (Preenchimento na cor verde; temáticas. Abaixo; rotas tecnológicas)	144
Figura 13 -	Caracterização da macrotemática Energia dos Oceanos (Preenchimento na cor verde; temáticas. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)	164
Figura 14 -	Caracterização da macrotemática geração termoelétrica (Preenchimento na cor verde; temáticas. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)	188
Figura 15 -	Caracterização da macrotemática geração de eletricidade via h ₂ e/ou CaC, em nível de temáticas (Preenchimento na cor verde)	216
Figura 16 -	Caracterização da macrotemática geração de eletricidade via h ₂ e/ou CaC, em nível de rotas tecnológicas (Preenchimento na cor verde; temática. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)	216
Figura 17 -	Caracterização da macrotemática geração de eletricidade via h ₂ e/ou CaC, em nível de rotas tecnológicas (Preenchimento na cor verde; temática. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)	216
Figura 18 -	Caracterização da macrotemática geração de eletricidade via h ₂ e/ou CaC, em nível de rotas tecnológicas (Preenchimento na cor verde; temática. Sem preenchimento; rotas tecnológicas)	217

Figura 19 - Caracterização da macrotemática Geração Hidroelétrica (preenchimento na cor verde; temáticas, sem preenchimento; rotas tecnológicas)	256
Figura 20 - Caracterização da macrotemática energia nuclear (preenchimento na cor verde, temáticas; abaixo, rotas tecnológicas)	278
Figura 21 - Caracterização da macrotemática armazenamento de energia (preenchimento na cor verde, temáticas; abaixo, rotas tecnológicas)	304
Figura 22 - Caracterização da macrotemática Soluções Apropriadas para a Geração de Energia Elétrica em Regiões Remotas (preenchimento na cor verde, temáticas; sem preenchimento; rotas tecnológicas)	339



Lista de Gráfico

Gráfico 1 -	Participação das fontes principais na produção de energia elétrica em 2015, nos países da OECD	39
Gráfico 2 -	Evolução da demanda de eletricidade no mundo	39
Gráfico 3 -	Capacidade de geração global de energia elétrica por fonte projetada para 2050	40
Gráfico 4 -	Participação das fontes na capacidade de geração de energia elétrica nos países da OECD americanos em momentos	40
Gráfico 5 -	Capacidade de armazenamento diário de eletricidade por região em 2011 e na projeção para 2050	41
Gráfico 6 -	Capacidade de armazenamento diário (GW) dos sistemas de armazenamento de energia conectados às redes elétricas (contexto, mundo)	44
Gráfico 7 -	Maturidade das tecnologias de armazenamento de energia, 2014	45
Gráfico 8 -	Projeção do tamanho da escala dos aerogeradores	46
Gráfico 9 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota	84
Gráfico 10-	Exemplo da evolução do estágio de maturidade	89
Gráfico 11 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Grande e Médio Portes da temática Previsão e Planejamento	102
Gráfico 12 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Pequeno Porte da temática Previsão e Planejamento	103
Gráfico 13 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Grande Porte da temática Implantação, Manutenção e Descomissionamento	105
Gráfico 14 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Médio e Pequeno Portes da temática Implantação, Manutenção e Descomissionamento	106
Gráfico 15 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Grande Porte da temática Monitoramento e Operação	108
Gráfico 16 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Médio Porte da temática Monitoramento e Operação	109
Gráfico 17 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Pequeno Porte da temática Monitoramento e Operação	109
Gráfico 18 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Grande Porte da temática Equipamentos e Sistemas	112
Gráfico 19 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Médio Porte da temática Equipamentos e Sistemas	112
Gráfico 20 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Pequeno Porte da temática Equipamentos e Sistemas	113
Gráfico 21 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Balance-of-System - BoS	128
Gráfico 22-	Evolução da maturidade tecnológica da rota Módulos de Silício Cristalino	129
Gráfico 23 -	Evolução da maturidade tecnológica da rota Módulos de Filmes Finos	130

Gráfico 24 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Módulos de Tecnologias Emergentes	131
Gráfico 25 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudo do Recurso Solar	133
Gráfico 26 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Distribuída	135
Gráfico 27 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Central Fotovoltaica	136
Gráfico 28 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas Isolados	137
Gráfico 29 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudo do Recurso Solar	154
Gráfico 30 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas Heliotérmicos de Linha Focal (refletor Fresnel e calha parabólica)	155
Gráfico 31 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas Heliotérmicos de Ponto Focal (torre solar e prato parabólico)	156
Gráfico 32 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Tecnologias Auxiliares: armazenamento, GD, química solar e hibridização	157
Gráfico 33 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Coluna de Água Oscilante	170
Gráfico 34 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Corpo Oscilante	171
Gráfico 35 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Acumulador de Água do Mar (Reservatório), via Movimento Horizontal das Ondas (Overtopping)	171
Gráfico 36 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Barragens de Marés Fonte: Elaboração própria.	173
Gráfico 37 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Turbina de Eixo Horizontal, com Fluxo Axial	175
Gráfico 38 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Turbina de Eixo Vertical, com Fluxo Cruzado	175
Gráfico 39 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Turbina Canalizada ou de Efeito Venturi	176
Gráfico 40 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Aberto	178
Gráfico 41 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Fechado	179
Gráfico 42 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Híbrido	179
Gráfico 43 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Energia Osmótica	181
Gráfico 44 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Biomassa	197
Gráfico 45 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Carvão	198
Gráfico 46 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Gás Natural	199
Gráfico 47 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Petróleo - Novas Tecnologias de Transformação do Insumo	201
Gráfico 48 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Resíduo Sólidos Urbanos	202
Gráfico 49 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudo dos Recursos Energéticos	203
Gráfico 50 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas de Cogeração	205



Gráfico 51 - Evolução da maturidade tecnológica da rota O&M, gestão de Ativos, Eficiência Energética e Repotenciação	206
Gráfico 52 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas de Geração Via Ciclo a Turbinas (gás e vapor)	207
Gráfico 53 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas de Geração Via Motores Alternativos de Elevado Desempenho	208
Gráfico 54 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível do tipo Alcalina (AFC)	224
Gráfico 55 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível do tipo Membrana Polimérica (PEM)	225
Gráfico 56 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível do tipo Ácido Fosfórico (PAFC)	226
Gráfico 57 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível do tipo Óxido Sólido (SOFC)	228
Gráfico 58 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível a Etano Direto (DEFC)	229
Gráfico 59 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível a Metanol Direto (DMFC)	230
Gráfico 60 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Célula a Combustível de Carbonato Fundido (MCFC)	231
Gráfico 61 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Eletrolisador Alcalino	233
Gráfico 62 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Eletrolisadores de Membranas Poliméricas	234
Gráfico 63 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Eletrolisadores de Óxidos Sólidos	235
Gráfico 64 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Gaseificação e Reforma a Vapor	237
Gráfico 65 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Ciclos Termoquímicos	238
Gráfico 66 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Processos Biológicos	239
Gráfico 67 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Processos Fotoeletroquímicos	240
Gráfico 68 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Hidrogênio Comprimido	242
Gráfico 69 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compostos Químicos	243
Gráfico 70 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Armazenamento Subterrâneo	244
Gráfico 71 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Hidrogênio Líquido	246
Gráfico 72 - Evolução da maturidade tecnológica da rota sistemas de absorção física	247
Gráfico 73 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas de Absorção Química	248
Gráfico 74 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Projeto Civil	262
Gráfico 75 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Interação com o Meio Ambiente	263
Gráfico 76 - Evolução da maturidade tecnológica da rota O&M	264
Gráfico 77 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudo do Recurso Hidráulico	265
Gráfico 78 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Central Geradora Hidroelétrica (CGH)	267
Gráfico 79 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Usina Hidroelétrica (UHE)	268

Gráfico 80 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCH)	268
Gráfico 81 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Central Hidrocinética (CHC)	270
Gráfico 82 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Usina Reversível (UHR)	271
Gráfico 83 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Reator de Água Pressurizada (PWR) de Segunda Geração	290
Gráfico 84 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Reator de Água Pressurizada (PWR) de Terceira Geração	291
Gráfico 85 - Evolução da maturidade tecnológica da rota tecnologias de Produção de Combustíveis de Segunda Geração	294
Gráfico 86 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Tecnologias de Produção de Combustíveis de Terceira Geração	294
Gráfico 87 - Evolução da maturidade tecnológica da rota tecnologias de Descomissionamento de Usinas	296
Gráfico 88 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Supercapacitores	312
Gráfico 89 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Super magnetos	313
Gráfico 90 - Evolução da maturidade tecnológica da Rota Baterias	316
Gráfico 91 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Armazenamento Térmico com e sem Transformação de Fase	319
Gráfico 92 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Termoquímicos (reatores)	320
Gráfico 93 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Bombeamento Reverso	322
Gráfico 94 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Caes	323
Gráfico 95 - Evolução da maturidade tecnológica da rota LAES	324
Gráfico 96 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Volante de Inércia	325
Gráfico 97 - Evolução da maturidade tecnológica da rota armazenamento em forma de gás	328
Gráfico 98 - Evolução da maturidade tecnológica da rota BMS	330
Gráfico 99 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Concentrada - Potencialidades Energéticas	349
Gráfico 100 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Concentrada - Composição dos Sistemas de Geração	350
Gráfico 101 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Concentrada - Gestão dos Sistemas de Geração	351
Gráfico 102 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Descentralizada - Potencialidades Energéticas	353
Gráfico 103 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Descentralizada - Composição dos Sistemas de Geração	355
Gráfico 104 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração Descentralizada - Gestão dos Sistemas de Geração	356
Gráfico 105 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração de Auxílio à Rede - Potencialidades Energéticas	358



Gráfico 106 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração de Auxílio à Rede - Composição do Sistema de Geração	359
Gráfico 107 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Geração de Auxílio à Rede - Gestão dos Sistemas de Geração	360
Gráfico 108 - Evolução da maturidade tecnológica da rota GD Rural - Potencialidades Energéticas	362
Gráfico 109 - Evolução da maturidade tecnológica da rota GD Rural - Composição dos Sistemas de Geração	364
Gráfico 110 - Evolução da maturidade tecnológica da rota GD Rural - Gestão dos Sistemas de Geração	365

Lista de Tabelas

Tabela 1 -	Cenário de investimento no mundo	42
Tabela 2 -	Cenário de investimento OECD	42
Tabela 3 -	Cenário de investimento OECD Américas	43
Tabela 4 -	Questões orientativas para a fundamentação das trajetórias da maturidade tecnológica	77
Tabela 5 -	Requisitos para os níveis de TRL	81
Tabela 6 -	Caracterização do <i>roadmap</i> para uma determinada rota tecnológica	85
Tabela 7 -	Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Grande e Médio Portes e Pequeno Porte	104
Tabela 8 -	Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Grande Porte e Médio e Pequeno Portes	107
Tabela 9 -	Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Grande Porte, Médio e Pequeno Porte	110
Tabela 10 -	Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Grande Porte, Médio e Pequeno Portes	114
Tabela 11 -	Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	115
Tabela 12 -	Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas BoS, Módulos de Silício Cristalino, Módulos de Filmes Finos e Módulos de Tecnologias Emergentes	132
Tabela 13 -	Fatores portadores de futuro da evolução da rota Estudo do Recurso Solar	134
Tabela 14 -	Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas GD, Central Fotovoltaica e Isolados	138
Tabela 15 -	Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	139
Tabela 16 -	Eficiência dos principais componentes de sistemas CSP em plantas CSP existentes (LOVEGROVE, 2014)	146
Tabela 17 -	Comparação e características dos principais sistemas de concentração solar para gerar eletricidade (adaptado de X. Xu, et al. 2016; IEA-ETSAP; IRENA, 2013).	147
Tabela 18 -	Capacidade mundial instalada de CSP até 2014 em MW (REN 21; WORLD ENERGY COUNCIL, 2016)	148
Tabela 19 -	Fatores portadores de futuro da evolução da rota Mapeamento do Recurso Solar	154
Tabela 20 -	Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistemas Heliotérmicos de Linha Focal (refletor Fresnel e calha parabólica), Sistemas Heliotérmicos de Ponto Focal (torre solar e prato parabólico) e Tecnologias Auxiliares: armazenamento, GD, química solar e hibridização	158
Tabela 21 -	Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	159



Tabela 22 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Coluna de Água Oscilante, Sistema de Corpo Oscilante e Overtopping	172
Tabela 23 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota Barragens de Marés	174
Tabela 24 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Turbina de Eixo Horizontal com Fluxo Axial, Turbina de Eixo Vertical com Fluxo Cruzado e Turbina Canalizada com Efeito Venturi	177
Tabela 25 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Aberto, Fechado e Híbrido	180
Tabela 26 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Conversores de Energia Térmica Oceânica de Ciclo Aberto, Fechado e Híbrido	182
Tabela 27 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	183
Tabela 28 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Biomassa, Carvão e Gás Natural	200
Tabela 29 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Petróleo, RSU e Estudo dos Recursos	204
Tabela 30 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistemas de cogeração, O&M, gestão de ativos, EE e repotenciação, sistemas de geração via ciclo a turbinas (gás e vapor) e sistemas de geração via motores alternativos de elevado desempenho	209
Tabela 31 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	210
Tabela 32 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas AFC, PEM e PAFC	227
Tabela 33 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas SOFC, DEFC, DMFC e MCFC	232
Tabela 34 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Eletrolisador Alcalino, Eletrolisadores de Membranas Poliméricas e Eletrolisadores de Óxidos Sólidos	236
Tabela 35 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Gaseificação e Reforma a Vapor, Ciclos Termoquímicos, Processos Biológicos e Processos Fotoeletroquímicos	241
Tabela 36 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Hidrogênio Comprimido, Compostos Químicos e Armazenamento Subterrâneo	245
Tabela 37 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Hidrogênio Líquido, Sistemas de Absorção Física e Sistemas de Absorção Química	249
Tabela 38 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	250
Tabela 39 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Projeto Civil, Interação com o Meio Ambiente (MA), O&M, Estudo do Recurso Hidráulico	266
Tabela 40 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas CGH, UHE e PCH	269
Tabela 41 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas CHC e UHR	272
Tabela 42 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	273
Tabela 43 - Capacidade nuclear instalada e em construção no Brasil	282

Tabela 44 - Evolução da geração e do ciclo do combustível nuclear no Brasil	282
Tabela 45 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Reator de Água Pressurizada (PWR) de Segunda e Terceira Gerações	292
Tabela 46 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnologias de Produção de Combustíveis de Segunda e Terceira Gerações	295
Tabela 47 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnologias de descomissionamento de usinas	297
Tabela 48 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	298
Tabela 49 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Supercapacitores e Super magnetos	314
Tabela 50 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota Baterias	317
Tabela 51 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistemas de Armazenamento de Energia Térmica com Transformação de Fase e Termoquímicos (reatores)	321
Tabela 52 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Bombeamento Reverso, Laes, Caes e Volante de Inércia	326
Tabela 53 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota Armazenamento em Forma de Gás	328
Tabela 54 - Fatores portadores de futuro da evolução da rota BMS	331
Tabela 55 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	332
Tabela 56 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Geração Concentrada - Potencialidades Energéticas - Composição dos Sistemas de Geração - Gestão dos Sistemas de Geração	352
Tabela 57 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Geração Desconcentrada - Potencialidades Energéticas - Composição dos Sistemas de Geração - Gestão dos Sistemas de Geração	357
Tabela 58 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Geração de Auxílio à Rede - Potencialidades Energéticas - Composição dos Sistemas de Geração - Gestão dos Sistemas de Geração	361
Tabela 59 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas GD Rural - Potencialidades Energéticas - Composição dos Sistemas de Geração - Gestão dos Sistemas de Geração	366
Tabela 60 - Ordem de prioridade dos investimentos em P&D nas rotas tecnológicas abordadas na macrotemática	367



Lista de siglas e abreviaturas

ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica
BIPV | Building Integrated Photovoltaics
BMS | Battery Management System
BNDES | Banco Nacional do Desenvolvimento
BoS | Balance-of-System
BTL | Biomass to Liquids
BWR | Reator de Água Fervente
CA | Corrente Alternada
Caes | Compressed Air Energy Storage
CC | Corrente Contínua
Cepel | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CGEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CGHs | Centrais Geradoras Hidrelétricas
CHCs | Centrais Geradoras Hidrocinéticas
Cnen | Comissão Nacional de Energia Nuclear
CPqD | Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
CSC | Current Source Converter
CSP | Concentrated Solar Power
CT&I | Ciência, Tecnologia e Informação
DNI | Direct Normal Irradiance
EC | Elemento Combustível
EPE | Empresa de Pesquisa Energética
FCN | Fábrica de Combustível Nuclear
FEE | Fator de Eficiência Energética
FV | Fotovoltaico
GD | Geração Distribuída
Gedae | Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas
Green | Grupo de Estudos em Energia
Grupo FAE | Grupo de Pesquisas em Fontes Alternativas de Energia
GSTC | The Gasification and Syngas Technologies Council
GTL | Gas to Liquid
HTP | High Thermal Performance
IAEA | Agência Internacional de Energia Atômica
IEA | International Energy Agency
IGCC | Integrated Gasification Combined Cycle
INB | Indústrias Nucleares do Brasil
IPHE | International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy
Labsolar | Laboratório de Energia Solar
Laes | Liquid Air Energy Storage

Lidar | Light Detection and Rangin
LRF | Lead- cooled Fast Reactor
LSF | Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos
LWR | Reator de Água Leve
MCFC | Molten Carbonate Fuel Cell
MIT | Massachusetts Institute of Technology
MTO | Methanol to Olefins
NDC | Nationally Determined Contributions
NEA | Nuclear Energy Agency
NT- Solar | Núcleo de Tecnologia em Energia Solar
O&M | Operação & Manutenção
OCDE | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico
P&D | Pesquisa, Desenvolvimento
PCHs | Pequenas Centrais Hidroelétricas
PD&I | Pesquisa, Desenvolvimento, Inovação
PE | Polietileno
PEM | Membrana de Troca Protônica
PMU | Phasor Measurement Unit
PP | Polipropileno
PSH | Pumped Storage Hydropower
PUC - RS | Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul
PUC- MG | Instituto Politécnico da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
PWR | Pressurized Water Reactor
PWR | Reator de Água Pressurizada
RBMKS | Reator refrigerado a água leve, com moderador tipo grafite (sigla russa)
REI | Redes Elétricas Inteligentes
RSUs | Resíduos Sólidos Urbanos
SAEs | Sistemas de Armazenamento de Energia
SEB | Sistema Elétrico Brasileiro
SEP | Sistema Elétrico de Potência
SFR | Sodium-cooled Fast Reactor
SIN | Sistema Interligado Nacional
SOFC | Solid Oxid Fuel Cell
TRL8 | Technology Readiness Levels 8
UAT | Ultra- alta Tensão
UFPA | Universidade Federal do Pará
UFPE | Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina
UHE | Usina Hidroelétrica
USP | Universidade de São Paulo
VHTR | Very High Temperature Reactor

Empresas:



Comitê estratégico:





Acesse www.cgee.org.br/energia



Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

