cgee

ANEEL
Agência Nacional de Energia Elétrica

Programa de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D

Prospecção tecnológica no setor elétrico brasileiro

Volume 4-8

Evolução tecnológica nacional no segmento de transmissão de energia elétrica

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

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 4-8

Evolução tecnológica nacional no segmento de transmissão de energia elétrica

cgee

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*

Catalogação na fonte

C389p
Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica: Evolução tecnológica nacional no segmento de transmissão de energia elétrica. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2017. v.4.

363 p.; il, 24 cm

ISBN: 978-85-5569-135-5 (eletrônico)

1. Energia Elétrica. 2. Transmissão de Energia Elétrica. 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 transmissão de energia elétrica. Brasília, DF: 2017. 363 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 4-8 - Evolução tecnológica nacional no seguimento de transmissão de energia elétrica

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)

Claudio Henrique Roth

Daniel Haubert de Freitas

Leonardo Ivo de Carvalho Silva

Lilian Guimarães de Azevedo Lopes

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)

Assistente administrativa

Simone Rodrigues Neto Andrade

Colaboradores na assistência administrativa

Silvana Rolon

Iris Cardoso

Alexandra Kruger

Solange Figueredo

Elaine Michon

Maria Helenice Silva

Carlos Antônio S. Da Cruz

Colaboradores na Comunicação, Edição, Editoração e Design

Bianca dos Anjos Torreão

Cesar Daher

Eduardo de Oliveira

Maisa Cardoso

Colaboradores na assistência administrativa

Stênio Neves Muniz

Thiago Silva

COLABORADORES - Participantes do 2º ciclo de reuniões de especialistas

Acácio Wey Filho (BIGHOST)
Adriana de Castro Passos (CEMIG)
Alexander Polasek (CEPEL)
Alexandre de Melho Silva (ONS)
Andre Luiz Maduro Pereira (Siemens)
Carla Damasceno (Ligth)
Daniel Yamashita (Procable)
Dante Hollanda (MCTIC)
Darcy Mello (Consultor)
Delmo de Macedo Correia (ONS)
Djalma Mosqueira Falcão (UFRJ)
Dourival de Souza Carvalho Junior (EPE)
Edisio Alves de Aguiar Júnior (INMETRO)
Edson Watanade (COPPE -UFRJ)
Eduardo Kazumi Yamakawa (LACTEC)
Fábio de Almeida Rocha (EPE)
Felipe Vigolvino Lopes (UnB)
Fernando Machado Silva (ONS)
Fernando Petinatti Ayello (SEL)
Geraldo Nicola (Eletronorte)
Geraldo Roberto de Almeida (TECHSYS)
Gil Vasconcelos (MATRIX)
Guilherme Gonçalves Sotelo (UFF)
Helena M. Wihelm (DIAGNO)
Ikuo Shigetoshi (Procable)
Ildemar C. Decker (Lab Plan / UFSC)
João Felix Nolasco (Consultor)
João Henrique Magalhães Almeida (EPE)
João Ignácio da Silva Filho (consultor)
John Francis Graham (State Grid)
Jorge Amon Filho (Consultor)

Jorge Miguel Ordacgi Filho (Consultor)
José Eduardo de Oliveira Filgueiras (Eletronorte)
Kleber Melo e Silva (UnB)
Luiz Cera Zanetta (POLI USP)
Luiz Siguenobu Obara (FURUKAWA do Brasil)
Luiz Vinicius Sequinel Puppi (COPEL Get)
Márcio Augusto Passos Barony (TAESA)
Márcio Nunes Accioly Lins (ONS)
Marco Antonio Macciola (Cepel)
Orlando José Rothstein (Eletrosul)
Oswaldo Régis Júnior (Chesf)
Patrícia Borin (Eletronorte)
Paula Maçaira (PUC-RIO)
Paulo Botelho (Consultor)
Paulo Cesar Vaz Esmeraldo (State Grid)
Paulo Fischer Toledo (ABB)
Paulo Gomes (ONS)
Paulo Sérgio Pereira Junior (Conprove)
Ricardo de Azevedo Dutra (State Grid)
Ricardo de Oliveira Brandão (AES ELETROPAULO)
Richard Magdalena Stephan (COPPE/UFRJ)
Rodrigo Augusto (ENEVA)
Rogério Camargo (State Grid)
Rogério Magalhães de Azevedo (Cepel)
Rubens de Andrade Jr. (UFRJ)
Ruy Carlos Ramos de Menezes (UFRGS)
Sergio de Oliveira Frontin (UnB)
Sergio Falcão (EPE)
Sidnei Massami Ueda (Alubar Metais e Cabos)
Tarcisio Misael de Lima (ISA CTEEP)
Woong Lee (Prysmian)
Ylani Freitas (ONS)

COLABORADORES - Contribuições nos Textos

Alexander Polasek (CEPEL)

Darcy Ramalho de Mello (Consultor)

Djalma Mosqueira Falcão (UFRJ)

Geraldo Almeida (TECHSYS)

Guilherme Gonçalves Sotelo (UFF)

João Felix Nolasco (Consultor)

John Francis Graham (State Grid)

Jorge Miguel Ordacgi Filho (Consultor)

Paulo Cesar Botelho Neves (Consultor)

Paulo Cesar Vaz Esmeraldo (State Grid)

Rubens Andrade (UFRJ)

Sergio de Oliveira Frontin (UnB)

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

1.5.1. Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada 34

1.5.2. Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua 34

1.5.3. Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados 35

1.5.4. Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (Facts) 35

1.5.5. Supercondutores 35

1.5.6. Estruturas, Condutores e Isoladores 35

1.5.7. Equipamentos de Alta Tensão e Subestações 35

1.5.8. Proteção, Automação e Controle do Sistema de Transmissão 36

1.5.9. Operação e Manutenção dos Sistemas de Transmissão 36

1.5.10. Redes Elétricas Inteligentes no Sistema Interligado Nacional (SIN) 36

1.6. Abordagem dos capítulos 36

1.7. Análise geral do grupo (tendências do grupo) 38

1.7.1. Forças motrizes das novas tecnologias 39

1.7.2. Novas tecnologias aplicadas aos sistemas de transmissão 40

Capítulo 2

Macrotemática Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada (CA)

2.1. Visão de futuro 55

2.1.1. Cenário setorial 55

2.1.2. Objetivo geral 56

2.1.3. Objetivo específico 57

2.1.4. Fundamentação 58

2.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 59

2.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas 60

2.3.1. Temática sistema de transmissão convencional 61

2.3.2. Temática sistema de transmissão não convencional 64

2.4. Priorização 70

Capítulo 3

Macrotemática Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua (CC)

3.1. Visão de futuro 75

3.1.1. Cenário Setorial 75

3.1.2. Objetivo geral 76

3.1.3. Objetivo específico 76

3.1.4. Fundamentação 78

3.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 79

3.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas 80

3.3.1. Temática transmissão em corrente contínua (CC) 80

3.3.2. Temática equipamentos e instalações de alta tensão aplicados a sistemas CC 83

3.4. Priorização 89

Capítulo 4

Macrotemática Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados

4.1. Visão de futuro 93

4.1.1. Cenário setorial 93

4.1.2. Objetivo geral 94

4.1.3. Objetivo específico 94

4.1.4. Fundamentação 95

4.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 97

4.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas 98

4.3.1. Temática sistemas de transmissão por cabos isolados 98

4.3.2. Temática materiais e tecnologias emergentes 104

4.4. Priorização 105

Capítulo 5

Macrotemática Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (Facts)

5.1. Visão de futuro 110

5.1.1. Cenário setorial 110

5.1.2. Objetivo geral 111

5.1.3. Objetivo específico 111

5.1.4. Fundamentação 112

5.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 113

5.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas 114

5.3.1. Temática compensadores em paralelo 115

5.3.2. Temática compensadores de potência reativa em série e paralelo-série 122

5.3.3. Temática controle e interação de equipamentos Facts 124

5.3.4. Temática estudos e modelos para a aplicação de Facts 126

5.4. Priorização 129

Capítulo 6

Macrotemática Supercondutores

6.1. Visão de futuro 135

6.1.1. Cenário setorial 135

6.1.2. Objetivo geral 136

6.1.3. Objetivo específico 137

6.1.4. Fundamentação 138

6.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 138

6.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas 148

6.3.1. Temática materiais supercondutores de alta temperatura crítica 148

6.3.2. Temática sistemas ancilares e isolantes 152

6.3.3. Temática aplicações da supercondutividade no setor elétrico de potência 156

6.4. Priorização 169

Capítulo 7

Macrotemática Estruturas, Condutores e Isoladores

7.1. Visão de futuro 174

7.1.1. Cenário setorial 174

7.1.2. Objetivo geral 174

7.1.3. Objetivo específico 175

7.1.4. Fundamentação 175

7.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 176

7.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas 177

7.3.1. Temática tecnologias envolvendo novos tipos de condutores, isoladores e estruturas 178

7.3.2. Temática novas tecnologias envolvendo projetos de linhas e componentes 183

7.3.3. Temática novas tecnologias para montagem e manutenção de linhas de transmissão 188

7.3.4. Temática desempenho elétrico e ambiental 190

7.4. Priorização 193

Capítulo 8

Macrotemática Equipamentos de Alta Tensão e Subestações

8.1. Visão de futuro 197

8.1.1. Cenário setorial 197

8.1.2. Objetivo geral 199

8.1.3. Objetivo específico 200

8.1.4. Fundamentação 201

8.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 202

8.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas 204

8.3.1. Temática subestação de alta tensão 204

8.3.2. Temática soluções em automação de subestações (SE) 208

8.3.3. Temática Transformadores e Buchas 210

8.3.4. Temática equipamentos de medição 215

8.3.5. Temática equipamentos de manobras 217

8.3.6. Temática para-raios 220

8.3.7. Temática materiais avançados 222

8.3.8. Temática tecnologias atuais e novas tecnologias envolvendo cabos isolados em alta e extra-alta tensão 224

8.3.9. Temática desempenho de equipamentos e subestações 225

8.3.10. Temática novas metodologias e tecnologias de sistemas de aterramento, monitoração e avaliação dos sistemas existentes e integração com as novas malhas 228

8.3.11. Temática teste e certificação de equipamentos para subestações 230

8.3.12. Temática tecnologias atuais e novas tecnologias envolvendo isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão 232

8.4. Priorização 234

Capítulo 9

Macrotemática Operação e Manutenção dos Sistemas de Transmissão

9.1. Visão de futuro 241

9.1.1. Cenário setorial 241

9.1.2. Objetivo geral 242

9.1.3. Objetivo específico 242

9.1.4. Fundamentação 243

9.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 244

9.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas 247

9.3.1. Temática operação do sistema 247

9.3.2. Temática manutenção na transmissão 257

9.4. Priorização 262

Capítulo 10

Macrotemática Proteção, Automação e Controle do Sistema de Transmissão

10.1. Visão de futuro 270

10.1.1. Cenário setorial 270

10.1.2. Objetivo geral 270

10.1.3. Objetivo específico 271

10.1.4. Fundamentação 273

10.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 274

10.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas 279

10.3.1. Temática desenvolvimento de Intelligent Electronic Devices (IEDS) para linhas de transmissão, barramentos, transformadores, reatores shunt e série e bancos de capacitores shunt 279

10.3.2. Temática desenvolvimento de funções de registrador digital de perturbações e de unidade de medição sincrofasorial 284

10.3.3. Temática desenvolvimento de barramentos óticos de estação e de processo - IEC 61850 287

10.3.4. Temática desenvolvimento de *softwares* para a aplicação de proteção, automação e controle 292

10.3.5. Temática desenvolvimento de *softwares* para aplicação de proteção, automação e controle 298

10.4. Priorização 300

Capítulo 11

Macrotemática Redes Elétricas Inteligentes no Sistema Interligado Nacional (SIN)

11.1. Visão de futuro 311

11.1.1. Cenário setorial 311

11.1.2. Objetivo geral 311

11.1.3. Objetivo específico 312

11.1.4. Fundamentação 313

11.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro 313

11.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas 315

11.3.1. Temática estratégias e sistemas de monitoramento, controle e proteção de área ampla 315

11.3.2. Temática novas tecnologias de suporte à tomada de decisões no Sistema Interligado Nacional (SIN) 317

11.3.3. Temática sensoriamento, medição e monitoramento 319

11.3.4. Temática integração de sistemas de tecnologia de informação e comunicação (TIC) 321

11.3.5. Temática integração de redes elétricas inteligentes da geração/transmissão 323

11.3.6. Temática integração de redes elétricas inteligentes da transmissão/ Distribuição *Roadmap* tecnológico 325

11.4. Priorização 329

Referências bibliográficas 333

Anexo - Planilha de indicadores 350

Lista de Figuras 353

Lista de Gráficos 354

Lista de Tabelas 358

Lista de siglas e abreviaturas 362

Resumo Executivo

No atual modelo do setor de energia elétrica, a expansão da rede básica de transmissão deve ser projetada de forma a permitir que os agentes de mercado lhe tenham livre acesso, permitindo a competição na geração e na comercialização de energia. O sistema de transmissão deve ainda considerar a interligação dos submercados, objetivando a modicidade tarifária, a melhoria contínua do desempenho e a segurança elétrica energética do sistema interligado. E, neste contexto, devendo sempre buscar a redução do impacto ambiental na implantação e na operação das linhas de transmissão, subestações e equipamentos.

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) destaca que as novas instalações de transmissão planejadas para entrar em funcionamento até 2022 demandarão investimentos da ordem de R$ 38, 8 bilhões, sendo R$ 25, 9 bilhões em linhas de transmissão, com o acréscimo de 21.503 km de novas linhas, e R$ 12, 9 bilhões em 54 novas subestações.

Deve-se indicar que foram estimados para a região Norte 10.961 km de novas linhas de transmissão, o que aponta para a necessidade de transmissão de longas distâncias, situação em que pode despontar a transmissão ultra-alta tensão em corrente alternada e em corrente contínua, notadamente para suprir os mercados das regiões Sudeste e Centro-Oeste.

Considerando-se esse cenário, e o aporte do Programa de 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 transmissão é caracterizado conforme apresentado a seguir, devendo-se observar os sistemas de corrente alternada e de corrente contínua para a transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias, conforme mencionado acima.

A transmissão de energia pode ser feita via outras tecnologias como os cabos isolados e os supercondutores, temas estes que fazem parte da análise apresentada a seguir. Necessita, basicamente, dos componentes da linha de transmissão (estruturas, condutores e isoladores), das subestações e dos diversos tipos de equipamentos de transformação, medição e chaveamentos. Além destes equipamentos tradicionais, foi ainda considerada a aplicação dos equipamentos que atuam no controle de diversas grandezas do sistema, contando essencialmente com a eletrônica de potência denominada de Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (Facts). Estes dispositivos também foram contemplados na análise.

A operação segura e confiável da transmissão precisa igualmente de dispositivos de proteção, automação e controle que devem atuar com estas funções e se integrar cada vez mais no conceito de redes inteligentes.

Por outro lado, não se deve esquecer que a malha elétrica evoluiu constantemente para atender às mudanças do mercado. Neste sentido, novas tecnologias entram na malha e devem conviver com diversas outras tecnologias que vêm chegando ao longo do tempo. É de primordial importância que os processos de operação e manutenção sejam capazes de operar este sistema de maneira segura e confiável e possam contar com tecnologias de monitoramento, objetivando principalmente a detecção precoce de possíveis problemas, permitindo que a manutenção preventiva possa ser exercida antes da ocorrência de falhas no sistema.

A análise apresentada a seguir fornece a visão de futuro, a evolução da maturidade tecnológica e as rotas priorizadas para cada uma dessas macrotemáticas.

Sistema de Transmissão em Corrente Alternada (CA)

- **Visão de futuro:** o foco da Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) está em explorar as principais vantagens técnicas de cada alternativa (Ultra-alta Tensão, Meia-Onda, Multifásico e Circuitos Múltiplos), aprimorando os critérios de projeto e estabelecendo os critérios técnicos de sua aplicabilidade, mantendo a confiabilidade e a segurança do Sistema Interligado Nacional (SIN).
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada (CA) dizem respeito ao aprimoramento de metodologias e critérios do planejamento da expansão da transmissão no âmbito das análises de fluxo de potência, estabilidade eletromecânica, curto-circuito, transitórios eletromagnéticos, confiabilidade, análises econômicas, otimização de perdas; e, ainda, a estudo, análise e desenvolvimento de métodos de sistemas de transmissão não convencionais. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas a sistemas de transmissão não convencional alcançará maturidade em diferentes décadas, a depender da mobilidade de transmissão. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores:[1] fomento à pesquisa, estudo da aplicabilidade dos métodos não convencionais, ciência, tecnologia e inovação (CT&I) e cadeia produtiva estruturados (RH, laboratórios, centros de pesquisa), sistemas de simulação dos métodos, além do fomento contínuo ao desenvolvimento tecnológico.

1 Fatores portadores de futuro.

- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura, os investimentos em PD&I devem priorizar os sistemas de transmissão convencionais com a sinalização das possibilidades de implantação de inovações tecnológicas, e em seguida com os modelos para estudos de planejamento da expansão do sistema em curto e médio prazo. Para o longo prazo, as tecnologias não convencionais têm priorização influenciadas pelo tempo de maturação.

Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua (CC)

- **Visão de futuro:** os investimentos em PD&I deverão focar no desenvolvimento nacional de componentes e equipamentos, em particular em tecnologias na criação de modelos computacionais e laboratoriais que representam as diversas tecnologias de um sistema de conversão CC-CA. Outro objetivo, não menos importante, é o aumento da produção nacional de equipamentos e componentes para a aplicação da tecnologia de conversão.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua dizem respeito à avaliação, ao estudo e ao desenvolvimento dos temas relacionados ao elo de corrente e tensão contínua, e aos conversores CA/CC, às novas tecnologias para transmissão e aos eletrodos para sistema de transmissão. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas alcançará maturidade comercial até a década de 2030. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: CT&I e cadeia produtiva estruturados (RH, laboratórios e centros de pesquisa), fomento à pesquisa, utilização de novos materiais, sistemas com melhoria no índice de perdas e sistemas de integração entre tecnologias.
- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura por esse sistema de transmissão, os investimentos em PD&I devem priorizar os eletrodos para sistema de transmissão em CC, o elo de corrente contínua, o elo de tensão contínua e, em seguida, os conversores CA/CC.

Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados

- **Visão de futuro:** desenvolver sistemas de transmissão por cabos isolados com melhores características dielétricas, alta confiabilidade, maior vida útil, perdas reduzidas, menores custos de construção, operação e manutenção, atendendo às necessidades relacionadas ao meio ambiente, às especificidades do mercado e às questões de segurança.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática dizem respeito à avaliação de vida útil remanescente do parque existente em cabos isolados, novos materiais condutores e dielétricos,

métodos e critérios de operação de cabos isolados e estudos sobre novas tecnologias em cabos com diferentes tipos de isolação. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas aos sistemas de transmissão por cabos isolados se encontra, na atualidade, em baixo grau de maturidade. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: CT&I e cadeia produtiva desenvolvida para essa tecnologia, capacitação de recursos humanos, novos materiais e otimização objetivando reduzir custos.

- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura, os investimentos em PD&I devem priorizar metodologias para a concepção e o dimensionamento de linhas de transmissão subterrâneas, a avaliação de variáveis ambientais, o desenvolvimento dos cabos e seus acessórios.

Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (Facts)

- Visão de futuro: o foco dos investimentos em PD&I é a absorção e a adaptação da tecnologia dos Facts pelo Brasil, servindo como subsídio para o projeto e o desenvolvimento de produtos nacionais confiáveis e economicamente competitivos. Considerando a ampla aplicabilidade da tecnologia Facts e a necessidade de atender à demanda do mercado, a nacionalização desta tecnologia se torna estratégica.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática dizem respeito às tecnologias de compensadores em paralelo, compensadores de potência reativa em série e paralelo-série, controle e interação de equipamentos Facts. Neste contexto, algumas das tecnologias associadas à macrotemática alcançarão maturidade comercial apenas em longo prazo. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: modelos de comunicação a serem desenvolvidos, testes e simulações laboratoriais e fator econômico.
- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura, os investimentos em PD&I devem priorizar os modelos para a aplicação de Facts, *Static Var Compensator* (SVC) e *Static Synchronous Compensator* (Statcom), controle de equipamentos Facts e interação com os demais equipamentos.

Supercondutores

- **Visão de futuro:** o foco do PD&I está em aumentar a confiabilidade na transmissão e na distribuição por meio da inserção de equipamentos e dispositivos supercondutores no sistema elétrico brasileiro.

- **Evolução da maturidade tecnológica**: as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas dizem respeito aos testes de cabos e limitadores supercondutores de corrente, estudos de viabilidade e aplicabilidade dos dispositivos e equipamentos supercondutores, até a elaboração de protótipos e planta piloto de um sistema de até 220 kV. Tecnologias como os armazenadores cinéticos de energia (*Flywheels*) de alta velocidade com mancais magnéticos supercondutores e os *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) também são abordadas nas linhas de pesquisa dessa macrotemática. A evolução tecnológica de supercondutores no Brasil possui um atraso de mais de 10 anos em relação ao mundo. Além do desenvolvimento tecnológico, são primordiais a promoção e os estímulos para a formação de consórcios e de parcerias envolvendo concessionárias de energia elétrica, fabricantes, universidades e centros de pesquisa (nacionais e internacionais).
- **Rotas priorizadas:** tecnologias que apresentaram maior prioridade foram os limitadores supercondutores de corrente de curto-circuito, cabos supercondutores e aerogeradores supercondutores com o intuito de verificar a viabilidade e a aplicabilidade dessas tecnologias.

Estruturas, Condutores e Isoladores

- **Visão de futuro:** os investimentos terão foco nas novas concepções de linhas e de seus componentes, além do estudo e diagnóstico de linhas existentes, que serão objeto de desenvolvimento visando ao aumento da confiabilidade, à redução de custos e ao prolongamento de vida das linhas. Outro fator importante é o contínuo aumento de capacidade que se requer das linhas de transmissão, o que implica o uso de novos tipos de condutores e estruturas.
- **Evolução da maturidade tecnológica**: as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas da macrotemática dizem respeito às tecnologias envolvendo novos tipos de condutores, isoladores e estruturas, à otimização de projetos de fundações e linhas aéreas (incluindo a avaliação de linhas existentes), e à montagem e manutenção de linhas de transmissão e mitigação do impacto ambiental. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial em longo prazo. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: desenvolvimento da engenharia de materiais, adequação às exigências de regulação ambiental, métodos de análise de resultados, verificação do índice de falhas em testes laboratoriais, introdução da robótica e fomento ao desenvolvimento da CT&I e da cadeia produtiva.
- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura, os investimentos em PD&I devem priorizar os novos tipos de condutores, a otimização de projetos de linhas aéreas (incluindo a avaliação de linhas existentes), a mitigação do impacto ambiental, os novos tipos de

estruturas, as novas tecnologias para montagem e manutenção de linhas de transmissão e a determinação da vida remanescente de linhas de transmissão e extensão de vida.

Equipamentos de Alta Tensão e Subestações

- **Visão de futuro:** o foco dos investimentos em PD&I para essa macrotemática deve ser no uso de alternativas tecnológicas, desde que devidamente analisadas e testadas, para a ampliação, a modernização e/ou a repotenciação da malha de transmissão existente, notoriamente envelhecida. Neste sentido, abre-se um leque enorme de alternativas, como o uso de nanotecnologia no desenvolvimento de novos produtos para refrigeração, proteção e isolamento de equipamentos e materiais supercondutores para cabos e limitadores de corrente de curto-circuito.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas dessa macrotemática dizem respeito à compactação de subestações, desenvolvimento de nanomateriais, nanofluidos e aplicação das ligas metálicas nanocristalinas e amorfas. Neste contexto, devido à grande quantidade de equipamentos, a maturidade tecnológica das diversas tecnologias tem uma grande variação da maturidade comercial. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: ensaios laboratoriais, desenvolvimento de materiais, fomento ao desenvolvimento da CT&I e cadeia produtiva.
- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura, os investimentos em PD&I devem priorizar os materiais avançados aplicados a equipamentos de alta tensão, subestações isoladas a gás, novas tecnologias envolvendo transformadores de potência e subestações híbridas.

Operação e Manutenção dos Sistemas de Transmissão

- **Visão de futuro:** visualiza-se alcançar uma modernização relacionada a essa macrotemática pautada na: uniformização, integração e otimização de processos, automação de instalações e implantação de tecnologias constantemente atualizadas nas instalações do SIN. O objetivo é melhorar a qualidade do serviço e do produto para fazer frente às novas exigências do mercado e adequar as atividades de operação e manutenção para atender às novas necessidades do setor elétrico. A visão funcional e operacional direciona trabalhos e tarefas a serem executados nas diversas áreas de Operação e Manutenção (O&M), incluindo seus aspectos organizacionais, gestão de riscos, aumento da consciência da complexidade do sistema elétrico nacional e novas exigências de conhecimento e formação para os engenheiros

e os técnicos do setor, principalmente para os operadores de centros de controle e para os técnicos de manutenção, no aspecto das novas tecnologias empregadas, segurança do sistema e das instalações.

- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica dessa macrotemática dizem respeito à operação do sistema em tempo real, ao monitoramento e avaliação dos efeitos de harmônicos, às técnicas para a recomposição do sistema, à segurança elétrica na operação e às técnicas e processos de manutenção da transmissão. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial em longo prazo. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: informações adequadas de metrologia para auxiliar as decisões em tempo real, integração de processos de análise de desempenho de instalações, levantamento de base de dados no que tange à recomposição do sistema.
- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura, os investimentos em PD&I devem priorizar a operação do sistema em tempo real, o monitoramento do sistema de transmissão, a *Phasor Measurement Unit* (PMU) na operação, o sistema especialistas para apoio à decisão operativa em tempo real.

Proteção, Automação e Controle do Sistema de Transmissão

- **Visão de futuro:** o foco principal dos investimentos em PD&I para essa macrotemática é atingir o domínio tecnológico do Intelligent Electronic Devices (IEDs) e dos demais dispositivos baseados em *hardware* de prateleira para atender às exigências presentes e futuras do SIN. Isto também se aplica ao domínio tecnológico dos respectivos dispositivos portáteis de testes e dos *softwares* tipicamente empregados nas aplicações de proteção, automação e controle em Sistemas de Transmissão.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas desta macrotemática dizem respeito ao desenvolvimento de modelos das funções de proteção, medição e automação e ao desenvolvimento de IEDs aplicada à transmissão. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial em longo prazo. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: investimentos em CT&I e em pesquisa aplicada, interesse de empresas brasileiras.
- **Rotas priorizadas:** para atender a demanda futura, os investimentos em PD&I devem priorizar o desenvolvimento de funções de proteção, o desenvolvimento de ferramentas para sistemas de teste em tempo real, desenvolvimento de funções de localização de faltas transitórias.

Redes Elétricas Inteligentes no Sistema Interligado Nacional (SIN)

- **Visão de futuro:** o foco principal dos investimentos em PD&I deve ser na absorção, adaptação e aperfeiçoamento da cadeia de produtos necessários à implantação no País da tecnologia de supervisão, controle, proteção e automação em área ampla do SIN, incluindo o desenvolvimento de metodologias, aplicativos e dispositivo tais como *software* para monitoração e controle, unidades de medição fasorial, concentradores de dados, *hardware* para redes de comunicações, automação de subestações.
- **Evolução da maturidade tecnológica:** as pesquisas que subsidiam a caracterização da evolução tecnológica das rotas desta macrotemática dizem respeito ao desenvolvimento de tecnologias para a monitoração, apoio à avaliação *online* da segurança, tecnologias de *software* e *hardware* para gerenciamento, utilização de técnicas de *Big Data* e *internet* das coisas. Neste contexto, a maior parte das tecnologias associadas à macrotemática alcançará maturidade comercial em longo prazo. A evolução dessas tecnologias depende, principalmente, dos seguintes fatores: sistema de supervisão e controle, interface com outras áreas de conhecimento, controle e interação de grande base de dados.
- **Rotas priorizadas:** para atender à demanda futura, os investimentos em PD&I devem priorizar novas estratégias e metodologias de suporte à tomada de decisões, *Wide Area Monitoring Protection and Control* (Wampac), sensoriamento e monitoramento avançado em funções de geração e transmissão.

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 seus 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 e, com base neles, estuda a necessidade de investimento na infraestrutura do setor. Todavia, 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 esperando 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 vários dos estudos em temas específicos encomendados ao CGEE pelo MCTIC ao longo dos últimos anos. Todavia, não há um processo definido nem um estudo amplo setorial de maneira a identificar oportunidades e, dessa forma, selecionar qual área a se aprofundar.

O planejamento da CT&I no setor também vem se tornando uma preocupação cada vez maior entre os agentes. Um estudo anterior do CGEE (2015) mostra que as empresas do setor também reconhecem a importância de estudos de prospecção focados na priorização de temáticas para melhorar a eficácia do Programa de P&D regulado pela 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

2 Ano base: 2015.

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), tem preocupação em definir uma estratégia para o programa de forma a gerar resultados mais eficientes. Para auxiliá-los com esse objetivo, a própria equipe idealizou o projeto *Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica*.

Nesse 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 desse setor. Busca ainda identificar quais são as possíveis ações de CT&I necessárias, de maneira a otimizar os recursos do Programa de P&D regulado pela Aneel no fomento ao desenvolvimento dessas temáticas.

A proposta foi apresentada às empresas concessionárias do setor elétrico, com recurso oriundo do programa P&D regulado pela Aneel para aplicar em P&D, de maneira a identificar os possíveis interessados em financiar o projeto. Iniciou-se, então, um processo de articulação entre o CGEE, a APINE (que liderou o processo junto às empresas) e as empresas interessadas para desenhar a proposta final e firmar o contrato de serviço. O resultado foi o estabelecimento de um contrato de 11 empresas[3] do setor com as executoras, APINE e o CGEE. A primeira ficou responsável pela interação entre as partes e a segunda com a responsabilidade da 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 subsidiarão a definição de temas estratégicos e projetos prioritários para a Aneel, como também auxiliarão o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e o Ministério de Minas e Energia (MME) no processo de formulação de políticas públicas voltadas ao setor de energia nacional.

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 Projeto[4] 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 Oficio 0203/2016 - SPE/Aneel, o foco do estudo é o setor de energia elétrica[5]. 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 temáticos[6]: 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 excluia a energia nuclear, que passu a ser incluída conforme decisões, constando em ata, das reuniões do comitê Técnico do projeto e retificado pelo Oficio 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 processso 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 empresas[7]: Formado por representantes das empresas parceiras que financiam o projeto, tem o objetivo de acompanhar tecnicamente e comandar a parte de gestão do projeto;

b) Comitê estratégico[8]: Formado por representantes das instituições que compõem a

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

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).

governança do setor, tem o objetivo de acompanhar tecnicamente o projeto de forma a alinhar as estratégias setoriais;

c) Comitê consultivo[9]: 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 Transmissão de Energia Elétrica 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 tecnológicos)* e a priorização dessas rotas para os investimentos de P&D no setor elétrico.

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

Contempla diversas linhas de pesquisa com foco no aprimoramento de processos já existentes e no desenvolvimento de novas tecnologias para o setor de transmissão de energia elétrica nas seguintes

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

vertentes: sistemas de transmissão em corrente alternada e contínua, cabos isolados e supercondutores, subestações e equipamentos de alta tensão, redes elétricas inteligentes aplicadas à transmissão, proteção, automação e controle. No tocante às diferentes etapas de implantação: planejamento, projeto, construção, operação, manutenção e comercialização.

1.5. Conceitos das macrotemáticas

Contempla diversas linhas de pesquisa com foco no aprimoramento de processos já existentes e no desenvolvimento de novas tecnologias para o setor de transmissão de energia elétrica nas seguintes vertentes: sistemas de transmissão em corrente alternada e contínua, cabos isolados e supercondutores, subestações e equipamentos de alta tensão, redes elétricas inteligentes aplicadas à transmissão, proteção, automação e controle. No tocante às diferentes etapas de implantação: planejamento, projeto, construção, operação, manutenção e comercialização.

As macrotemáticas relativas ao Grupo Temático Transmissão são conceituadas a seguir:

1.5.1. Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I aplicada ao planejamento para a escolha da melhor alternativa para a expansão do sistema, dentre as modalidade de Transmissão em Corrente Alternada até 800 kV, Transmissão em Ultra-alta Tensão, Transmissão Multifásica, Transmissão em Meia Onda e Transmissão em Circuitos Múltiplos. Há também caminhos para PD&I em aprimoramento das ferramentas computacionais, modelos, conceitos e critérios, para que sejam aperfeiçoados para a realização dos estudos de planejamento da expansão e operação do sistema, considerando-se a inserção de novas tecnologias no sistema.

1.5.2. Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I aplicada para transmissão por elos de corrente ou tensão contínua. Contempla também os sistemas multiterminais e soluções inovadoras para tecnologia de equipamentos de alta tensão aplicados a transmissão em Corrente Contínua (CC), tais como transformadores, disjuntores em CC e filtros de harmônicos.

1.5.3. Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I aplicada ao planejamento (inclui projeto), implantação (construção civil, instalação/logística), manutenção, operação, modernização e descomissionamento da transmissão por cabos isolados e acessórios.

1.5.4. Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (Facts)

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I aplicada aos Facts. Abrange não somente diversos tipos de compensadores de potência, compensadores com armazenamento de energia, interação entre equipamentos Facts, considerando as etapas de planejamento (inclui projeto), manutenção, operação, modernização e descomissionamento.

1.5.5. Supercondutores

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I relativas ao desenvolvimento dos materiais supercondutores de alta temperatura e sua aplicação em equipamentos essenciais para a transmissão de energia elétrica, tais como dispositivos limitadores da corrente de curto-circuito, transformadores, dispositivos de armazenamento de energia entre outros equipamentos.

1.5.6. Estruturas, Condutores e Isoladores

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I de novos produtos e materiais para componentes físicos das linhas aéreas de transmissão. Abrange também técnicas e tecnologias para o planejamento (inclui projeto LTs), implantação (construção civil, instalação/logística), manutenção (monitoramento), operação, modernização (aprimoramentos) e descomissionamento de estruturas, condutores e isoladores de linhas aéreas de transmissão.

1.5.7. Equipamentos de Alta Tensão e Subestações

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I aplicada aos equipamentos de alta tensão e as subestações (SEs), que são parte de um sistema de potência que compreende as extremidades de linha de transmissão. Abrange novas tecnologias envolvendo os transformadores, reatores, capacitores,

dispositivos de manobra, entre outros, assim como o planejamento (inclui projeto), implantação (construção civil, instalação/logística), manutenção (monitoramento), operação, modernização e descomissionamento associados à macrotemática. Aspectos relativos a materiais, automação, aterramento, desempenho são igualmente abordados.

1.5.8. Proteção, Automação e Controle do Sistema de Transmissão

A macrotemática abrange as possibilidades de PD&I aplicada à proteção, automação e controle do sistema de transmissão. Considera os sistemas de proteção utilizados para detectar as condições anormais de operação, isolar defeito e promover a recuperação do sistema de forma rápida, confiável, seletiva e segura. Também aborda aspectos relativos à implementação de sistemas de proteção e das metodologias utilizadas na avaliação de distúrbios em sistemas de transmissão, teste de equipamentos, aplicação em campo de dispositivos de proteção, entre outros.

1.5.9. Operação e Manutenção dos Sistemas de Transmissão

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I relativas a aspectos relevantes da operação em tempo real e a manutenção dos sistemas de transmissão. Considera estratégias de operação, centros de operação, dispositivos de monitoramento, tipos de manutenção, entre outros assuntos.

1.5.10. Redes Elétricas Inteligentes no Sistema Interligado Nacional (SIN)

A macrotemática aborda as possibilidades de PD&I relativas a redes elétricas inteligentes na transmissão. No tocante ao monitoramento, controle e proteção de área ampla e novas estratégias e metodologias de suporte a tomadas de decisões. Também aborda o desempenho da rede com a integração de redes elétricas inteligentes de transmissão com a geração e distribuição.

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 d 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 Cenário Setorial Geral (ver 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 (ver 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

---

10 Para a compreensão do procedimento realizado para a formulação dos gráficos, ver Capítulo Metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia").

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

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 (tendências do grupo)

No século XX, a evolução da demanda era perfeitamente quantificável e basicamente a geração era centralizada, o que permitia o dimensionamento do sistema de transmissão para atender ao pico e possíveis emergências.

Os especialistas, neste século XXI, vêm enfatizando que todo o processo de otimização do sistema elétrico deve ser modificado, tornando-o cada vez mais inteligente e robusto objetivando:

- Ampliar o uso de fontes renováveis;
- Permitir uma participação importante da geração distribuída;
- Desenvolver e aplicar dispositivos de armazenamento.

E para isso deve-se contar intensamente com a eletrônica de potência e com as soluções da tecnologia da informação e comunicação, objetivando tornar o sistema cada vez mais confiável, com custos adequados e redução dos impactos ambientais.

Assim, serão necessários novos conceitos e ferramentas para que o planejamento das redes no futuro possa ser elaborado, garantindo uma segura transição do sistema de energia elétrica do século XX para o século XXI, em que os principais desafios serão as incertezas da demanda e geração e as restrições decorrentes da aceitação do público aos grandes projetos de geração e transmissão.

Esses desafios estão fortemente relacionados às metas que países do mundo inteiro vêm estabelecendo para o aumento da inserção de fontes renováveis simultaneamente às metas para a redução de emissão de CO_2.

Diversos países vêm patrocinando ou mesmo oferecendo linhas de financiamento para o desenvolvimento de projetos de P&D e, subsequentemente, de projetos pilotos, de forma a apressar a transição para o futuro desejado, para o qual pode-se visualizar claramente que as novas tecnologias serão de importância capital.

Deve-se ressaltar que este é um esforço conjunto de países, fabricantes e empresas, que cada vez mais compartilham os seus estudos e pesquisas em âmbito internacional, tendo como pano de fundo o meio ambiente e o que o setor elétrico pode fazer para reduzir sistematicamente a emissão de CO_2.

1.7.1. Forças motrizes das novas tecnologias

Os especialistas indicam que os modernos sistemas de energia elétrica devem enfatizar e atender com responsabilidade crescente aos requisitos indicados a seguir:

- Prover alta confiabilidade e segurança de suprimento;
- Apresentar soluções econômicas;
- Reduzir o impacto ambiental.

A pressão ambiental cresce cada vez mais, com a sociedade atuando contra a concessão de novas faixas de passagens e contra certas modalidades de fontes de geração. Neste sentido, vem sendo dada ênfase a tecnologias que possam contribuir para a redução de emissão de CO_2 e reduzir a necessidade da ampliação da infraestrutura de transmissão e geração. Em atendimento a estas demandas, o setor de energia elétrica vem apresentando dois movimentos muitos importantes:

- Ampliação intensa do uso de fontes renováveis de energia;
- Incentivos para a massificação da geração distribuída.

E neste contexto os sistemas de transmissão devem se adequar, pois do lado da geração se espera a entrada de grandes parques de energia eólica e solar e do lado da distribuição, a geração distribuída. Neste sentido, é importante para os especialistas de transmissão o acompanhamento desses dois movimentos, pois são vetores importantes nas atividades voltadas para a implantação dos sistemas de transmissão.

Sendo assim, pode-se enfatizar que essas duas ações vêm impondo a necessidade de revisitar os conceitos de planejamento, projeto, operação, manutenção e gestão, tanto no nível da transmissão, quanto no da distribuição.

É notável a formação de novos comitês de estudos e grupos de trabalhos internacionais que objetivam formular, entender e contribuir para a aplicação desses novos conceitos e novas tecnologias, dentre os quais podem-se citar:

- Aplicação de medidores inteligentes que promovem a efetiva disponibilização de informações com a consequente atuação ativa dos consumidores;
- Redes ativas de distribuição, resultando em fluxos bidirecionais em decorrência de aplicação de geração distribuída e veículos elétricos;
- Novos conceitos na operação, proteção e controle dos sistemas de energia elétrica, considerando as interações com os consumidores e com os diferentes tipos de geração de energia;
- Novos conceitos no planejamento dos sistemas de potência, considerando as restrições ambientais e as diversas possibilidades de soluções tecnológicas;
- Novas ferramentas e modelos computacionais que possam auxiliar o aumento da capacidade de transmissão da infraestrutura existente, devendo-se dar ênfase à conversão de sistemas de corrente alternada em sistemas de corrente contínua;
- Ampliação do uso da eletrônica de potência e seu impacto na qualidade de energia, controle e segurança;
- Novas ferramentas e dispositivos de tecnologia da informação e comunicação (TIC) para promover a integração entre os agentes e, principalmente, a coleta, tratamento e fornecimento de indicadores para a tomada de decisão a partir de um volume muito grande de dados e informações;
- Sistemas de armazenamento de energia e os possíveis efeitos no dimensionamento dos sistemas de transmissão e operação.

Essencialmente essas são as forças motrizes que vêm impulsionando o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para as usinas geradoras, subestações, linhas de transmissão e equipamentos. A seguir, estão relacionadas algumas dessas tecnologias que podem ser aplicadas tanto para a expansão do sistema, quanto para a melhoria dos sistemas atuais.

1.7.2. Novas tecnologias aplicadas aos sistemas de transmissão

O uso intensivo de eletrônica de potência vem oferecendo diversas possibilidades de aumentar a capacidade de transmissão e de tornar o sistema mais flexível, seguro e controlável, principalmente por meio da aplicação dos equipamentos Facts.

A transmissão em CC vem sendo intensamente utilizada por mais de 50 anos e tem sido sistematicamente aprimorada em decorrência da eletrônica de potência, em que se pode citar o Voltage Sourced Converter (VSC), sistemas acima de 800 kV CC e sistemas multiterminais. Deve-se ainda indicar que

na Europa as dificuldades na obtenção de novas faixas de passagem têm levado à substituição das linhas de transmissão por cabos ou mesmo transformado linhas de CA em CC.

Com relação à transmissão em CA, devem ser ressaltados os sistemas de transmissão acima de 800 kV (UATCA). Os estudos e as simulações realizados para a especificação das linhas de transmissão e dos equipamentos de UATCA e os resultados das pesquisas realizadas em laboratórios e instalações experimentais indicaram alguns tópicos específicos que necessitam de investigações cuidadosas. Esses tópicos afetam principalmente os disjuntores e os para-raios, que devem atuar de maneira efetiva no controle das sobretensões de manobra e, portanto, têm influência capital nos isolamentos das linhas e dos equipamentos.

Com relação às linhas de transmissão, têm sido investigados: a avaliação de projetos de novas geometrias de torres que possibilitem reduzir os custos, a redução da agressão ao meio ambiente, a facilidade de instalação e o aumento de confiabilidade e os estudos que permitam a máxima compactação das linhas de transmissão, incluindo novos arranjos das fases ou novas geometrias de torres.

Com relação às linhas CA existentes, é importante postergar a sua substituição, desenvolvendo processos que possam permitir o seu carregamento até o máximo permitido. Neste sentido, surgem as ferramentas de carregamento dinâmico - *Real Time Thermal Rating Systems* (RTTRS) -, com o monitoramento em tempo real das condições térmicas críticas de linhas e equipamentos para identificar e atuar antes que os limites sejam ultrapassados.

É necessário, também, estabelecer critérios e metodologias para a determinação da vida útil remanescente de linhas de transmissão existentes, considerando-se a análise integrada de todos os seus componentes submetidos aos diferentes efeitos, elétricos, mecânicos e ambientais.

Pode-se, ainda, indicar as seguintes alternativas para a transmissão de energia:

A transmissão de energia por hidrogênio é uma alternativa para minimizar os impactos ambientais, pois se integra com diversas fontes renováveis de energia, como a biomassa, a solar, a eólica, a hidroelétrica, a geotérmica e as marés, mesmo aumentando as eficiências de fontes não renováveis, como o gás natural.

Os supercondutores de alta temperatura, os condutores de alta temperatura e as linhas de transmissão isoladas a gás são igualmente outros temas em desenvolvimento.

Novas tecnologias voltadas para subestações e equipamentos de alta tensão

As inovações tecnológicas voltadas para os equipamentos de alta tensão se concentram principalmente na aplicação de novos materiais, monitoramento e métodos de análise para a melhoria do desempenho como:

- Metodologia para a estimativa do tempo de vida remanescente de equipamentos, incluindo o aprimoramento das técnicas de avaliação do estado.
- Revitalização dos equipamentos existentes.
- Aprimoramento das técnicas, métodos de projeto e de fabricação de transformadores.
- Desenvolvimento de instrumentos e sistemas de diagnósticos, objetivando a utilização do método de análise de resposta em frequência (FRA) de transformadores.
- Desenvolvimento de transformadores de Ultra-alta Tensão (1.000-1.200 kV).
- Suportabilidade dielétrica de transformadores e buchas frente a transitórios ultrarrápidos - *Very Fast Transient* (VFT) - em subestações blindadas isoladas a SF6.
- Aplicação de supercondutores de alta temperatura em transformadores.
- Solicitações impostas aos disjuntores durante chaveamento de reatores.
- Desenvolvimento de disjuntores de alta tensão a vácuo.
- Desenvolvimento de transformadores de instrumentos ópticos.
- Uso de sistemas especialistas na manutenção de equipamentos de alta tensão.
- Monitoramento integrado de subestações de alta tensão.
- Desenvolvimento de transformadores defasadores e *Unified Power Flow Controller* (UPFC) para o controle de fluxo de potência.
- Desenvolvimento de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito.

Novas tecnologias aplicadas à proteção, automação e controle

Podem-se citar os novos sistemas de proteção e controle em que os dispositivos possam identificar e analisar os eventos, efetuar as devidas medidas de isolamento, corrigir as falhas e, finalmente, fazer os devidos registros. Ou seja, objetiva-se que o restabelecimento seja realizado o mais rápido possível após uma perturbação no sistema.

Neste sentido, precisam ser utilizadas as *Wide Area Monitoring System* (Wams), que se constituem em uma plataforma de informação em tempo real como aplicativos inteligentes para processar a enorme quantidade de dados. Pode-se contar, ainda, com o auxílio dos PMU, ou Síncronos Fasores, que coletam as informações em tempo real das diferenças angulares entre a tensão e a corrente (além das magnitudes), de forma a detectar com extrema rapidez as tendências de instabilidade dinâmica da rede. Estas inovações vão requerer o estabelecimento de novas estratégias na área de operação de sistemas, em que será de capital importância a educação e o treinamento dos operadores, que devem contar com simuladores para sistematicamente analisar as possibilidades de contingências no sistema para que possam antecipadamente estabelecer as possíveis soluções e configurações da rede.

Novas tecnologias voltadas para os sistemas de comunicação

Os sistemas de telecomunicações são essenciais para a modernização das instalações de geração e transmissão. Os dispositivos da rede elétrica atual possuem capacidade de fornecer informações, ser telecomandados, receber dados, serem sincronizados por fontes externas e realizar diversas outras funções. Toda esta inovação dos processos passa a necessitar de um sistema de telecomunicações que atenda aos requisitos específicos.

Os sistemas de rádio dedicados ao apoio das equipes de manutenção precisarão ser substituídos brevemente por imposição da Anatel, que está constantemente alterando o uso de espectro de frequências e substituindo definições de faixas (sistemas analógicos por digitais).

A inovação da rede de telecomunicações caminha inexoravelmente para as redes de pacotes. A tecnologia IP é considerada a mais adequada para a utilização em redes de telecomunicações de missão crítica das empresas elétricas. Os sistemas de pacotes ainda necessitam de comprovação de desempenho nas empresas brasileiras. Poucas são as empresas elétricas que já implantaram com sucesso as redes IP. O mesmo não ocorre com as operadoras de telecomunicações, mas os requisitos de desempenho são diferentes em relação às redes de missão crítica.

Operação e manutenção

O desempenho da atividade de manutenção afeta de maneira sensível o resultado das empresas de transmissão e de geração, na medida em que influi na frequência e na duração das indisponibilidades.

As concessionárias de energia elétrica passaram a buscar métodos de manutenção cada vez mais confiáveis e que demandam menor tempo de execução. Os sistemas de monitoramento e as técnicas de diagnóstico representam papel relevante para o alcance de resultados positivos.

O envelhecimento das instalações e dos equipamentos do sistema de transmissão e geração, assim como a sua utilização mais intensa, significa um desafio adicional a ser enfrentado pela atividade de manutenção.

É internacionalmente reconhecido que as atividades vinculadas ao monitoramento, diagnóstico e prognóstico constituem um processo de evolução e desenvolvimento contínuo. Muito já foi feito nas últimas décadas, mas ainda há muito a se fazer. Algumas técnicas de diagnóstico estão consolidadas, enquanto outras requerem aperfeiçoamento. O aspecto prognóstico também requer aprendizado, por lidar com características extremamente complexas, como a vida útil remanescente do isolamento, condições operacionais etc.

Embora os sistemas de monitoramento *online* e diagnósticos estejam crescendo em popularidade, persistem a falta de padronização e as dúvidas a respeito de confiabilidade e benefícios potenciais desses sistemas, o que impede a sua consolidação tecnológica. Mesmo as concessionárias que os adquiriram ainda encaram com ressalvas a sua adoção.

A atividade de manutenção acompanhou a evolução tecnológica observada em outros países, fruto da necessidade de lidar com tecnologia pioneira em suas instalações e da importância de cada uma de suas unidades operativas para o sistema interligado. Não obstante, ainda há muito a ser feito no campo das inovações tecnológicas no sentido de otimizar as atividades de manutenção.

O treinamento adequado é requisito fundamental para que as equipes de operação e manutenção se adaptem às novas tecnologias e passem a aceitá-las.

A Gestão de Ativos deve ser encarada como instrumento fundamental no processo decisório vinculado às atividades de manutenção e à migração para a manutenção centrada na confiabilidade.

Dois itens vêm sendo enfatizados no sentido de aprimorar a operação dos sistemas elétricos: carregamento dinâmico de linhas de transmissão e controle coordenado de tensão.

O conhecimento da capacidade térmica da linha permite aumentar a transmissão de potência em condições ambientais favoráveis (na maioria dos casos) e, ao mesmo tempo, evitar situações raras de sobrecarga, garantindo uma instalação eficiente dos equipamentos do sistema. As aplicações dos

dispositivos de carregamento dinâmico de linhas baseiam-se no cálculo/estimativa da temperatura dos condutores em tempo real. As principais técnicas possíveis são: modelo térmico da linha, com base no conhecimento de condições atmosféricas; medição direta da catenária e temperatura da linha; e estimativa com base em medições de Wams.

O controle coordenado de tensão a partir de recursos de potência reativa do sistema de potência pode ser brevemente resumido em termos de: melhor qualidade de tensão; menor variação em torno de perfis definidos de tensão; melhor segurança do sistema de potência explorando a disponibilidade de reservas de potência reativa em condições de emergência; maior capacidade de transferência de potência, aumentando os níveis de potência ativa transmissíveis sem problemas de estabilidade de tensão; maior economia na operação, minimizando as perdas totais, através da redução dos fluxos reativos e melhor utilização das fontes de potência reativa.

Redes inteligentes

São diversos os conceitos de uma rede inteligente. Dentre eles aquele apresentado pela China, que tem foco em todos os setores de um sistema de potência, incluindo geração, transmissão, distribuição e armazenamento. Assim, uma rede inteligente é definida como:

> Integração de fontes renováveis de energia, novos materiais, equipamentos avançados, telecomunicação e informação, controle e supervisão e tecnologia de armazenamento, de maneira a apoiar a gestão digital, as decisões inteligentes e as transações interativas entre geração, transmissão e distribuição.

Por esse conceito, pode-se indicar que as redes inteligentes teriam o papel de interligar todas as tecnologias, que certamente vão desempenhar um papel crucial na transição para uma rede elétrica sustentável no futuro próximo, tendo em vista que:

- Tornam o sistema mais inteligente - mais flexível, mais dinâmico a mudanças bruscas e capaz de responder a altos valores de geração variável, principalmente solar e eólica;
- Podem atuar como elemento facilitador da penetração de fontes renováveis de energia no sistema de transmissão;
- Podem criar novos modelos de negócios através do aprimoramento do fluxo de informações entre os consumidores e os agentes do mercado;

- Podem auxiliar as distribuidoras na operação do sistema com a inserção cada vez maior da geração distribuída.

Neste sentido, é de extrema importância que os especialistas de transmissão possam conhecer as inovações de proteção, automação, controle, monitoramento e segurança cibernética, que vêm sendo aprimoradas sistematicamente com a ajuda dos dispositivos de eletrônica de potência e de tecnologia da informação e telecomunicação.

São relevantes os seguintes fatos relacionados à aplicação de redes inteligentes:

Desde 2009, o Departamento de Energia dos Estados Unidos, em conjunto com a indústria de energia elétrica, vem investindo cerca de US$ 7, 9 bilhões em 99 projetos relacionados a redes inteligentes - *Smart Grid Investment Grant* (SGIG) -, com o envolvimento de 228 empresas de energia elétrica e de outras organizações, alcançando praticamente todos os estados.

O Japão tem uma rede elétrica dotada de alto padrão de confiabilidade, e mesmo assim as empresas, fabricantes e laboratórios vêm há mais de 20 anos buscando aprimoramentos, em que atualmente se destacam as pesquisas e desenvolvimentos voltados para a tecnologia de redes inteligentes. O principal objetivo do programa japonês de redes inteligentes é alcançar uma total substituição dos combustíveis fósseis pelas fontes renováveis de energia, promovendo a chamada sociedade com baixa emissão de carbono (*low carbon society*).

Mesmo com poucas iniciativas voltadas para as áreas de geração e transmissão, considera-se importante acompanhar as pesquisas em andamento no País, tendo em vista a grande quantidade de empresas de alta tecnologia envolvidas nos projetos pilotos. São empresas de renome mundial, que certamente irão apresentar soluções inovadoras que poderão ser do interesse das empresas brasileiras. O Japão promoveu diversos projetos pilotos, denominados de Comunidades Inteligentes (*Smart Communities*), para o atendimento dos requisitos de meio ambiente, segurança e economia.

A China implantou diversas inovações no seu setor de energia elétrica e ganhou muita experiência na implantação de diversos sistemas de corrente contínua (±600 kV, ±800 kV) e ultra-alta tensão em corrente alternada (1.000 kV), robusto sistema de telecomunicação via fibra óptica e satélite. Na maioria das províncias que usa o Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (Scada) está em operação 10 Wams e 1000 PMUs.

China reconhece que a tecnologia de rede inteligente oferece oportunidades para o surgimento de novas tecnologias com grande potencial para a resolução de questões atuais que o País precisa enfrentar para consolidar o futuro desenvolvimento da sua malha de geração, transmissão e distribuição.

A rede elétrica indiana, embora possuindo sistemas modernos de transmissão em corrente contínua e linha de teste em ultra-alta tensão em corrente alternada (1.000 - 1.200 kV), apresenta diversos problemas como: *déficit* de demanda, especialmente nas horas de pico, perdas técnicas e comerciais muito altas, pequena contribuição de fontes renováveis na matriz energética. Tendo em vista todos estes problemas, foi considerada necessária e premente a modernização da rede elétrica. Neste sentido, a Índia julga que a aplicação da tecnologia de rede inteligente pode representar um passo importante para atingimento desta meta.

Pela experiência internacional, pôde-se observar que as redes inteligentes não são apenas uma questão técnica. As redes inteligentes não podem ser tratadas apenas como uma tecnologia, o que facilitaria ter seus impactos avaliados, mas devem ser tratadas como um conjunto de novas tecnologias disponíveis que abrem uma vasta gama de oportunidades para transformar o antigo sistema de abastecimento de energia em um sistema mais moderno e sustentável que envolve muito mais atores.

A implementação das redes inteligentes na Europa tem sido fragmentada desde o início e não deslanchou como o esperado. Os principais motivos foram as incertezas em relação à aceitação do consumidor aos novos modelos de mercado de distribuição, aos modelos de negócios para os investidores, aos investimentos globais necessários e, em certa medida, à tecnologia necessária. Atualmente, o desenvolvimento das redes inteligentes nos diversos países ocorre em velocidade diferente, com diferentes objetivos e com base em normas distintas.

O setor de energia nos EUA tem evoluído lentamente a partir de uma série de monopólios verticalmente integrados, fornecendo serviço de energia para pequenas regiões e depois para um mercado regional interligado, cada vez mais competitivo. Enquanto a transição tem sido diferente de região para região, a tendência geral no mercado atacadista de energia em massa tem sido um dos progressos. As mudanças nos últimos 20 anos têm sido particularmente dramáticas. Sob o estímulo das autoridades federais, surgiram as organizações regionais de transmissão (RTOs), sistemas sofisticados de precificação da transmissão, o setor de energia independente, empresas de energia elétrica reestruturadas, comércio de energia futura e os direitos de transmissão, mercados de energia em tempo real e planejado e separação da indústria. O surgimento da tecnologia da rede inteligente permite que os mercados de energia sejam reformados e que o uso da energia seja mais eficiente e mais limpo. Esta tecnologia promete oferecer aos clientes informação melhor e mais atualizada, a fim de influenciar o comportamento mais eficiente.

Integração dos sistemas de transmissão aos sistemas de distribuição

Torna-se cada vez mais importante as interações dos Operadores do Sistema de Transmissão (TSOs) com os Operadores do Sistema de Distribuição (DSOs) para analisar as possíveis questões críticas surgidas devido à penetração maciça de Geração Distribuída (GD).

Os problemas relacionados às fontes de energia distribuídas forçaram os operadores do sistema a repensar a gestão das suas redes e como os TSOs e DSOs vêm abordando este tema, em que atualmente se reconhece a necessidade de uma coordenação global e a realização de projetos técnicos de colaboração mútua.

As fontes de energia renováveis e de geração distribuída estão remodelando profundamente o setor elétrico. As fontes renováveis deverão crescer 40% nos próximos cinco anos em todo o mundo, estimuladas pela energia solar PV e eólica *onshore*. Neste novo cenário, o sistema de potência tradicional caracterizado por um fluxo unidirecional de energia está abrindo espaço para o novo paradigma das Redes Inteligentes, nas quais há um fluxo bidirecional de energia e de informação dos centros de controle para o usuário/produtor.

Neste cenário, as novas tecnologias baseadas em comunicação integrada e controle estão emergindo e sendo adaptadas para o uso em operações de rede. Em particular, a medição inteligente e o gerenciamento pelo lado da demanda estão se espalhando e afetam a operação da rede do ponto de vista tanto do TSO, quanto do DSO. Na verdade, o primeiro pode ajudar o DSO a prever melhor as cargas e melhorar o planejamento e a operação da rede. Este último pode ajudar a prevenir interrupções e congestão na rede de AT/MT, deslocando ou controlando diretamente as cargas.

Do ponto de vista da operação da rede, é necessária uma interação mais forte entre DSO e TSO. Eles terão que trabalhar juntos nas áreas de interrupção, despacho, controle de tensão e controle de fluxo de potência. Outras áreas que precisam ser revisadas podem incluir o papel estratégico da união DSO/TSO, a organização e os sistemas no ambiente da Rede Inteligente, o desenvolvimento de habilidades e competências, problemas de caráter contestatório, o planejamento de orientações em um ambiente inteligente, tarifas de rede e benefícios regulatórios para os clientes. A qualidade de energia, a confiabilidade do abastecimento e a segurança pessoal devem ser consideradas quando é introduzida uma mudança na estrutura e na operação da rede elétrica.

Macrotemáticas de Grupo de Transmissão

Estão listados, a seguir, os principais temas tecnológicos em desenvolvimento e pesquisa em âmbito mundial, com base no estado da arte apresentado.

Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada (CA)

- Sistemas de transmissão em ultra-alta tensão (UATCA);
- Integração de fontes renováveis de energia;
- Planejamento integrado transmissão - distribuição;
- Novas ferramentas e modelos computacionais para planejamento do sistema.

Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua (CC)

- Aplicação de VSC;
- Transmissão em ultra-alta tensão (UATCC);
- Sistemas multiterminais.

Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados

- Sistemas de monitoramento para operação e manutenção.

Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (Facts)

- Nova geração de Facts baseada em VSC.

Supercondutores

- Transformadores Supercondutores
- Aerogeradores Supercondutores

- Armazenadores de Energia Supercondutores (Flywheel)
- Armazenadores de Energia Supercondutores (SMES)

Condutores, Isoladores e Estruturas

- Impactos das mudanças climáticas nos sistemas de transmissão;
- Aplicação de dispositivos de carregamento dinâmico de linhas de transmissão;
- Estruturas em ultra-alta tensão (China);
- Sistemas múltiplos de transmissão (China);
- *Uprating* de linhas de transmissão (conversão CA para CC);
- Sistemas de monitoramento (Internet das Coisas).

Equipamentos e Subestações

- Gestão de ativos - Estimativa da vida remanescente (*Health Index*);
- Sistemas de monitoramento;
- Superação de equipamentos;
- Subestações em SF6.

Operação e Manutenção dos Sistemas de Transmissão

- Integração operadores transmissão com operadores distribuição;
- Aumento da capacidade de transmissão (DLR etc.);
- Controle coordenado de tensão;

Proteção, Automação E Controle do Sistema de Transmissão

- Inserção de fontes renováveis de energia;
- Segurança cibernética;

- Desenvolvimento de IEDs;
- Aplicação de Wams no sistema;
- Aplicação de PMUs no sistema de transmissão.

Redes Elétricas Inteligentes na Transmissão

- Inserção de novas tecnologias;
- Inserção de fontes renováveis no sistema.

Capítulo 2

Capítulo 2

Macrotemática Sistemas de Transmissão em Corrente Alternada (CA)

2.1. Visão de futuro

2.1.1. 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. A fonte hidrelétrica (UHE) contribuirá com cerca de 180 GW e, portanto, será a fonte principal de expansão de geração elétrica nas próximas décadas. Este potencial, ainda inexplorado, encontra-se praticamente na sua totalidade na região amazônica. Como os grandes centros consumidores se encontram no litoral da região Nordeste e na região Sudeste do Brasil, é de se esperar que o uso de transmissão a longa distância seja a alternativa técnica e economicamente mais viável, ou seja, a transmissão em Corrente Alternada em Alta Tensão (CAAT) e/ou a transmissão em Corrente Contínua em Alta tensão (CCAT). Dependendo dos montantes de potência a serem transferidos e da distância até o centro consumidor a aplicação da tecnologia em Ultra Alta Tensão em Corrente Alternada-UAT CA ou da tecnologia em Ultra Alta Tensão em Corrente Contínua - UAT CC, podem igualmente se constituir em alternativas promissoras que devem ser avaliadas técnica e economicamente.

No caso de aplicação de sistemas de transmissão em CA, a escolha final dependerá não só dos aspectos mencionados, mas também dos impactos socioambientais nos corredores estabelecidos. A aplicação de sistemas de transmissão em UATCA poderá ser competitiva na transmissão a longa distância, dependendo de aplicações específicas, em que será necessária uma pormenorizada comparação econômica com a alternativa em UATCC. Além da tecnologia UATCA, apropriada para a transmissão a longa distância, deve também ser considerada a transmissão a Meia-Onda.

Com a chegada dos grandes troncos de potência nas proximidades dos centros consumidores, é necessário fazer o rebaixamento para níveis de tensão inferiores aos da UAT para distribuir estes grandes blocos de potência entre os diferentes centros de carga. Neste contexto, dado às restrições socioambientais, sempre existentes e cada vez mais restritivas, torna-se imperioso otimizar as faixas de passagem dessas linhas que conectam as diversas subestações, tornando-as menos impactantes sob o ponto vista fundiário e ambiental. A otimização das faixas de passagem, que também são impactadas com o aumento populacional nessas regiões, e a utilização de linhas com circuitos múltiplos e/ou linhas multifásicas deverão ser sempre crescentes.

Outro aspecto que merece destaque é a recapacitação das linhas existentes, principalmente pelas dificuldades cada vez mais crescentes para obtenção de novos corredores, o que leva a necessidade do máximo aproveitamento das faixas existentes. O aumento da capacidade de transmissão por faixa de passagem pode ser obtida a partir do aumento dos níveis de tensão, do uso de condutores termo-resistente, promovendo a conversão das linhas de CA em CC.

2.1.2. Objetivo geral

Para se considerar a aplicação das tecnologias neste tema, é necessária a adequação de modelos, conceitos e critérios para a realização de estudos de planejamento da expansão do sistema, de modo que sejam revistas as práticas usuais consideradas nos sistemas tradicionais.

Para a utilização de sistemas de CA para transmissão a longa distância, a alternativa que se coloca mais promissora a médio prazo é a transmissão em UATCA, uma vez que já existe em operação em alguns países, como a China e a Índia. Os sistemas de transmissão de Meia-Onda e Multifásico podem ter sua aplicação desenvolvida nas próximas décadas, uma vez que será necessária a implantação de um protótipo e o envolvimento dos fabricantes de equipamentos associados. Sabe-se que para a tecnologia de Meia-Onda já foram realizados estudos, mas ainda é necessária uma abordagem prática, principalmente quando esta tecnologia for aplicada entre subestações no sistema elétrico. Da mesma forma, a tecnologia de sistema multifásicos não tem sido aplicada internacionalmente e, portanto, uma visão prática do tema estabelecendo a fronteira de sua aplicabilidade, e o conhecimento de suas vantagens técnicas e econômicas, é de fundamental importância. Já a aplicação de linhas de circuitos múltiplos se torna uma necessidade imperiosa, não só pela grande aplicabilidade em diversos países, mas também por não oferecer uma barreira de desconhecimento tecnológico.

A recapacitação de sistemas de transmissão existentes também sinaliza a possibilidade de implantação de inovações tecnológicas, em que seria necessário desenvolver meios práticos de intervenção nas linhas existentes para não comprometer a segurança do SIN.

Portanto, o foco do PD&I está em explorar as principais vantagens técnicas de cada alternativa, aprimorando os critérios de projeto, e em estabelecer os critérios técnicos de sua aplicabilidade, evitando comprometer a confiabilidade e a segurança do SIN.

2.1.3. 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):

- Critérios e modelos para a sua aplicabilidade no sentido de oferecer soluções de alta confiabilidade e segurança para o SIN;
- Especificações técnicas juntamente com os fabricantes de equipamentos no sentido de apresentar soluções factíveis de curto prazo em sua fabricação;
- Aprimoramento das metodologias referentes às análises econômicas para a expansão da transmissão, incluindo precificação das perdas;
- Desenvolvimento de Planejamento de longo prazo com incertezas, com ponderação de probabilidades de cenários.

Médio prazo (2020-2030):

- Metodologias para a determinação da vida remanescente de linhas existentes através de diagnósticos mais precisos proporcionados por novas tecnologias;
- Métodos de avaliação do estado de equipamentos, linhas de transmissão e extensão da vida útil, visando ao desenvolvimento de métodos de recapacitação;
- Avaliação e aplicação de sistemas de monitoramento nos equipamentos e linhas de transmissão, visando ao aumento da capacidade de transmissão;

- Avaliação de tecnologias de recapacitação e melhoria da confiabilidade de linhas de transmissão;
- Metodologias e critérios para a tomada de decisão técnico-econômica sobre a implantação de linhas de circuitos múltiplos em comparação com circuitos simples na mesma faixa de passagem ou em faixas distintas;
- Resultados de estudos comparativos sobre impactos ambientais entre as diversas tecnologias: campo elétrico, campo magnético, estudos sobre faixas de passagem, dentre outros;
- Critérios de projeto mecânico das torres de transmissão no sentido de torná-las mais seguras, diante da concentração de grandes blocos de potência;
- Critérios de projeto elétricos no sentido de aumentar seu desempenho frente a surtos de manobra e descarga atmosféricas;
- Avaliação de métodos de controle de sobretensões de manobras e modelos sofisticados de desempenho quanto às descargas atmosféricas;
- Metodologias de proteção e controle de sobretensões nos sistemas de Meia-Onda e Multifásicos;
- Metodologias para aprimorar os modelos digitais das tecnologias em foco no sentido de eliminar eventuais dúvidas de sua representação e desempenho no sistema elétrico, consolidando sua aplicabilidade;

Longo prazo (2030-2050):

- Desenvolver modelos digitais baseados em testes de laboratório para UATCA, aumentando a confiança de sua utilização;
- Desenvolver protótipos de equipamentos e de linhas de transmissão associados às tecnologias em discussão, tais como transformadores defasadores e sistemas de proteção;
- Monitorar o desempenho das tecnologias implantadas, verificando e aferindo ajustes.

2.1.4. Fundamentação

Quanto às alternativas em foco dos sistemas de CA, diante da provável aplicação no horizonte de curto e médio prazo, ou seja, nas próximas duas décadas, pode-se afirmar que, por volta do ano 2040, todas as tecnologias mencionadas deverão ter equacionado todos os detalhes específicos. É importante mencionar que apesar da projeção de os grandes blocos de potência disponíveis na

região amazônica virem a ser desenvolvidos no decorrer dos próximos 20 anos, segundo a cenarização indicada pela Empresa de Pesquisa Energética/Ministério de Minas e Energia (MME/EPE), as tecnologias em foco deverão estar consolidadas e ter a sua aplicabilidade condensada através de critérios bem definidos para a sua utilização. Acredita-se que, uma vez tendo sido explorado o potencial hidrelétrico da região amazônica, com a utilização de transmissão a longa distância para os grandes centros consumidores, a utilização de redes em CA se dará através da recapacitação das linhas existentes, inclusive transformando linhas de CA em linhas de CC. Portanto, com o aumento da capacidade de transmissão nos corredores existentes, com as restrições ambientais já intransponíveis para a instalação de novos troncos de transmissão, a utilização de recapacitação será absolutamente necessária. Como objetivo mais específico das metodologias em foco, é necessário testar a sua aplicabilidade no SIN, ou seja, determinar o momento em que a sua aplicação não oferece risco de instabilidade ao SIN em caso de perda do respectivo tronco. Esta aplicação vai depender da base de geração disponível no momento e consequentemente serão necessárias simulações e estabelecimentos de modelos *benchmark* para representar fidedignamente as tecnologias em foco nas ferramentas usuais no Brasil.

Com relação às tecnologias de UATCA, o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) vem se capacitando para desenvolver ensaios até o nível de 1200 kV. Testes sob condições meteorológicas brasileiras deverão ser revistos em comparação com o que já foi desenvolvido no exterior, principalmente os parâmetros que afetam o dimensionamento entre fases, que podem indicar uma maior compactação das torres, com consequente impacto econômico e ambiental menor.

As tecnologias de Meia-Onda e Multifásica requerem um forte envolvimento com os fabricantes de equipamentos, pois são necessárias adaptações no sentido de enquadrar as especificações dos equipamentos existentes no atendimento às novas solicitações. Por razões já indicadas, as linhas de circuitos múltiplos terão uma aplicação imediata devido às restrições socioambientais. Sob o ponto de vista de P&DI, é preciso estabelecer os critérios ótimos de projeto e, caso a caso, quais os condicionantes necessários, visando sempre à modicidade tarifária.

2.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática 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 de tempo até 2050 (ver Anexo).

A métrica fabricação de equipamentos demonstra o estágio de evolução de produção. Tendo em 2020 ensaios com protótipos, a previsão é que em 2025 o conhecimento esteja disponível, mas a fabricação para fins comerciais vai depender de outras variáveis de mercado.

A métrica aplicação no SIN prevê a inserção da tecnologia no SIN. Estima-se, no contexto dessa macrotemática, que em 2030 já se tenha um início dessa aplicação em operação, chegando a ter ligações internacionais em 2050.

Os ensaios/testes de desempenho: protótipos, isolamento, condições operativas mostram-se como uma métrica apresentada em percentual.

A métrica confiabilidade traz em cenário geral os períodos em que os critérios de confiabilidade estarão definidos e quando os testes terão esse padrão.

As métricas tecnológicas dessa macrotemática que têm interdependência ou influência com outras áreas são: geração distribuída, fontes térmicas e nucleares, interligações internacionais e geração na Amazônia. Em todas, é analisado o nível de influência que cada uma dessas vertentes tem, podendo ser baixo, médio ou alto.

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 - Anexo, 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 (SEB) potencializam a melhora ou a participação dessas questões no SEB, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

2.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordadas as métricas de desenvolvimento e as curvas de evolução da maturidade tecnológica das rotas consideradas no projeto. Tais pontos são apresentados, por temática, a seguir.

2.3.1. Temática sistema de transmissão convencional

As rotas contempladas nessa temática possuem maturidade e sinergia próprias para serem desenvolvidas no curto prazo (2017-2020). Basicamente, os modelos e os critérios de planejamento a serem estabelecidos fazem parte da infraestrutura básica que norteará o desenvolvimento das outras rotas. O aumento da capacidade de transmissão também é objeto de destaque na implantação de novidades tecnológicas.

Com as dificuldades advindas das restrições socioambientais na implantação de novas linhas de transmissão, a utilização de métodos de recapacitação de linhas de transmissão e o uso de novas metodologias e equipamentos, como a tecnologia Facts, têm como objetivo superar problemas com o licenciamento ambiental. Como, de uma forma geral, existem vários métodos e dispositivos disponíveis para aumentar a capacidade de transmissão nas instalações existentes, estas rotas visam indicar quais seriam aquelas que necessitariam de adaptações e ajustes para a sua aplicação imediata no SIN.

Roadmap tecnológico

Rota - Sistema de transmissão existente com a sinalização das possibilidades de implantação de inovações tecnológicas:

As inovações tecnológicas de aplicação no curto e médio prazos estão disponíveis, porém dispersas. Isto significa que um raqueamento das metodologias disponíveis é necessário. O mercado nacional, em parte, dispõe de todos os elementos para a sua concretização. A evolução tecnológica dessa rota é representada no Gráfico 1.

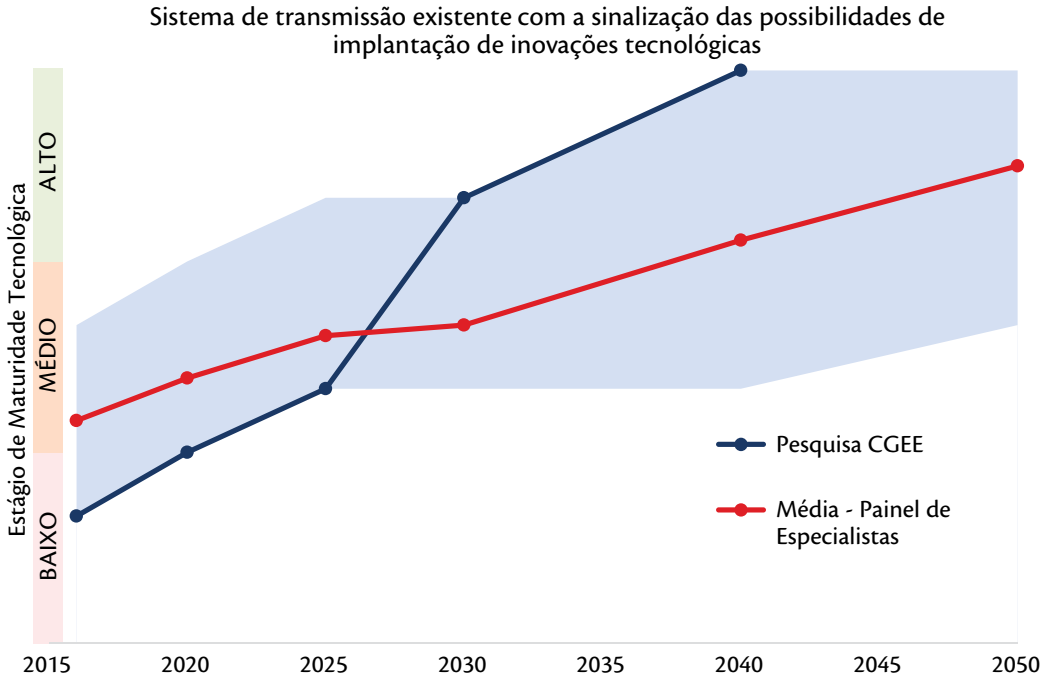

Gráfico 1 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Transmissão Existente com a Sinalização das Possibilidades de Implantação de Inovações Tecnológicas

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Modelos, conceitos e critérios para a realização de estudos de planejamento da expansão do sistema:

Trata-se de discussão e consolidação de modelos, conceitos e critérios. Os recursos humanos com conhecimento para o desenvolvimento desta atividade estão dispersos em várias empresas e em universidades. A evolução tecnológica dessa rota é mostrada no Gráfico 2.

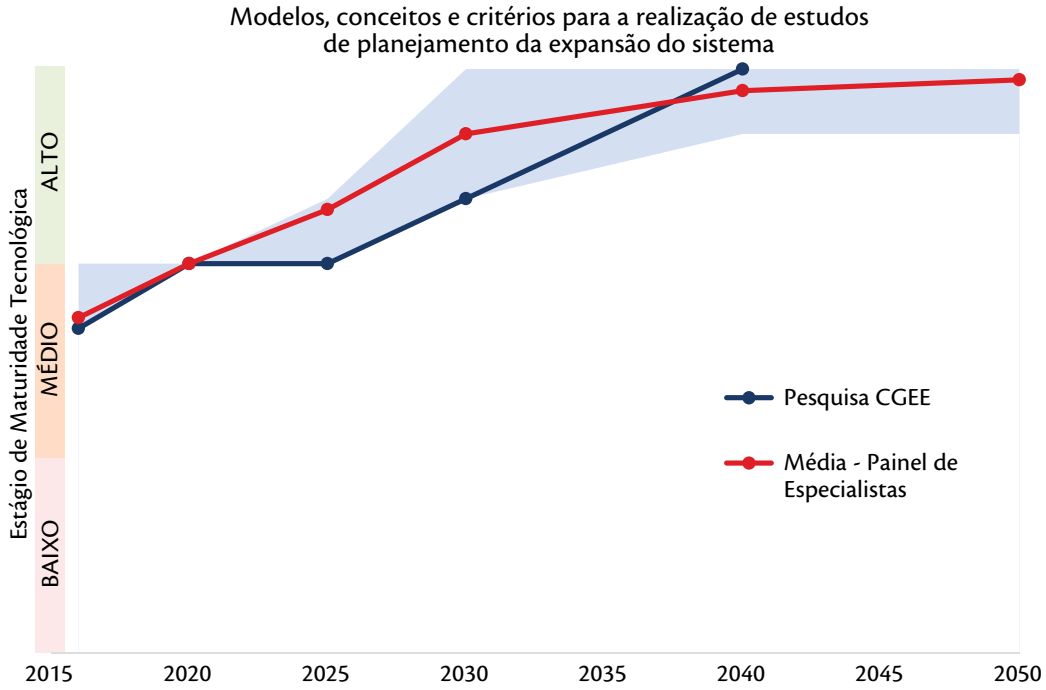

Gráfico 2 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Modelos, Conceitos e Critérios para a Realização de Estudos de Planejamento da Expansão do Sistema

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas, Modelos, Conceitos e Critérios para a Realização de Estudos de Planejamento da Expansão e Sistema de Transmissão Existente com a Sinalização das Possibilidades de Implantação de Inovações Tecnológicas

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Sistema de Transmissão Convencional	Modelos, conceitos e critérios para realização de estudos de planejamento da expansão do sistema	Fatores portadores de futuro	Recursos humanos com conhecimento					
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
	Sistema de transmissão existente com a sinalização das possibilidades de implantação de inovações tecnológicas	Fatores portadores de futuro	Restrições socioambientais na implantação de novas linhas de transmissão			Raqueamento das metodologias disponíveis.		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

2.3.2. Temática sistema de transmissão não convencional

Roadmap tecnológico

Rota - Transmissão em Ultra-alta Tensão

A aplicabilidade da Tecnologia de UAT é dependente dos montantes de potência a serem transferidos e da distância até os centros consumidores. A sua aplicação deve ser comprovada através de estudos técnico-econômicos comparativos entre outras alternativas, por exemplo, a transmissão em CC. A possibilidade de sua aplicação pela integração de usinas na região amazônica e de outras concentrações

de geração expressiva, por exemplo os parques eólicas, poderão intensificar seu uso na próximas décadas. O Gráfico 3 mostra a evolução da maturidade tecnológica da rota apresentada.

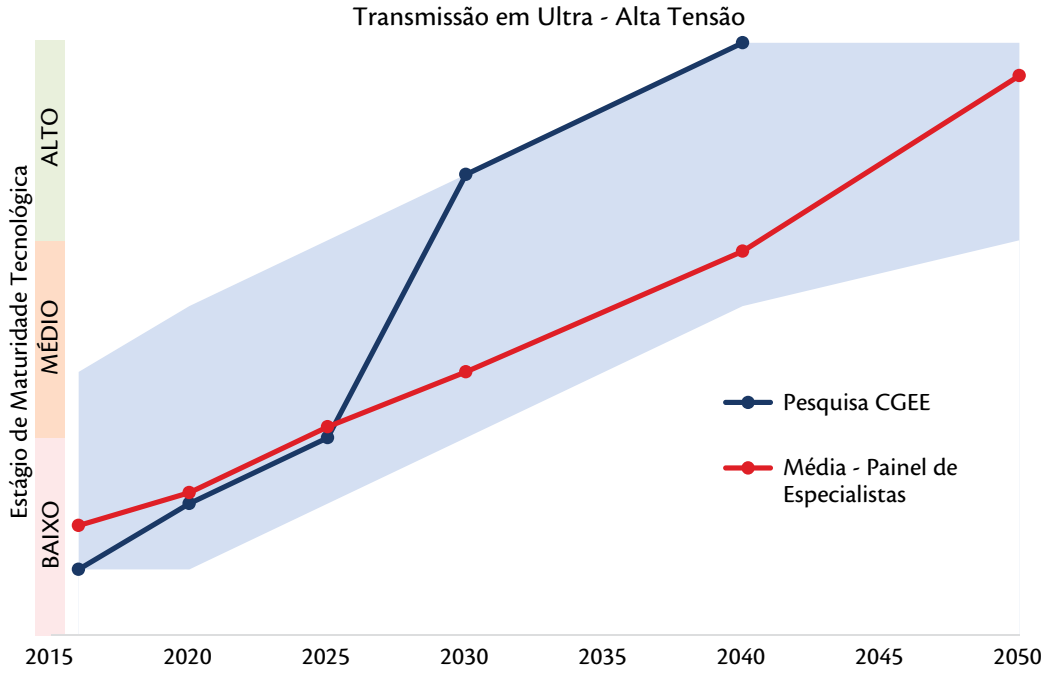

Gráfico 3 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transmissão em UAT

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Sistema de Transmissão Multifásico

É uma alternativa para o aumento da capacidade de transmissão de um corredor com restrições ambientais, não aplicável para a transmissão a longa distância em consequência dos custos envolvidos. Portanto, pode vir a ser a alternativa tecnológica para a conexão com os grandes troncos de transmissão nas proximidades dos centros consumidores, uma vez que é necessário fazer o rebaixamento para níveis de tensão inferiores aos da UAT para distribuir estes grandes blocos de potência. A evolução dessa rota está representada no Gráfico 4.

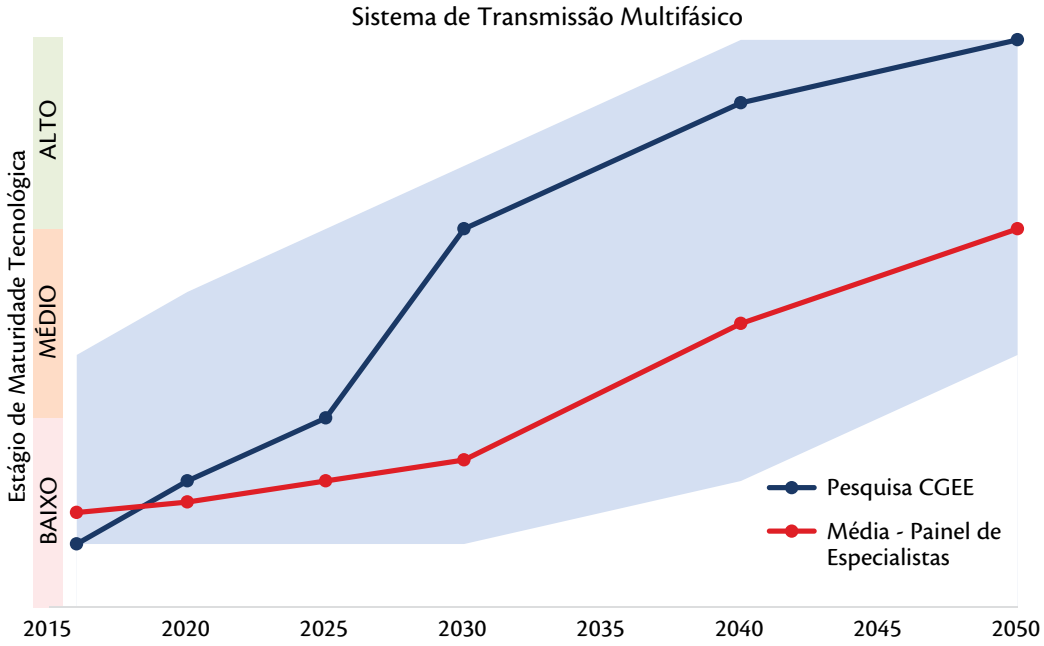

Gráfico 4 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Transmissão Multifásico

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas transmissão em UAT e Sistema de Transmissão Multifásico

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
'Temática Sistema de Transmissão não Convencional	Transmissão em Ultra-alta Tensão	Fatores portadores de futuro	Grande acervo de pesquisas em outros países RH em alguns centros de excelência		Disponibilidade de laboratórios para ensaios de isolamento	Estudos de sua aplicabilidade Desenvolvimento de protótipos	Plena utilização	
		Maturidade	BAIXO			ALTO		
	Sistema de Transmissão Multifásico	Fatores portadores de futuro	Médio acervo de pesquisas em outros países RH em alguns centros de excelência Restrições ambientais		Disponibilidade de laboratórios para ensaios de isolamento	Estudos de sua aplicabilidade		Plena utilização
		Maturidade	BAIXO			MÉDIO		'ALTO

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Sistema de Transmissão em Meia-onda

É uma alternativa que somente se aplica em transmissões de longa distância. Pode-se dizer que é uma via expressa de transmissão de energia desde a geração até os centros de carga. A conexão de usinas na região amazônica, e de outras concentrações de geração expressiva, pode viabilizar o uso da Transmissão em Meia-onda, uma vez demonstrada a sua exequibilidade técnico-econômica. O maior desafio na aplicação dessa tecnologia é a conexão entre subestações, ou seja, ser embutida na rede existente, que requer o desenvolvimento de equipamentos com características especiais como os transformadores defasadores. O Gráfico 5 mostra o desenvolvimento tecnológico da meia-onda.

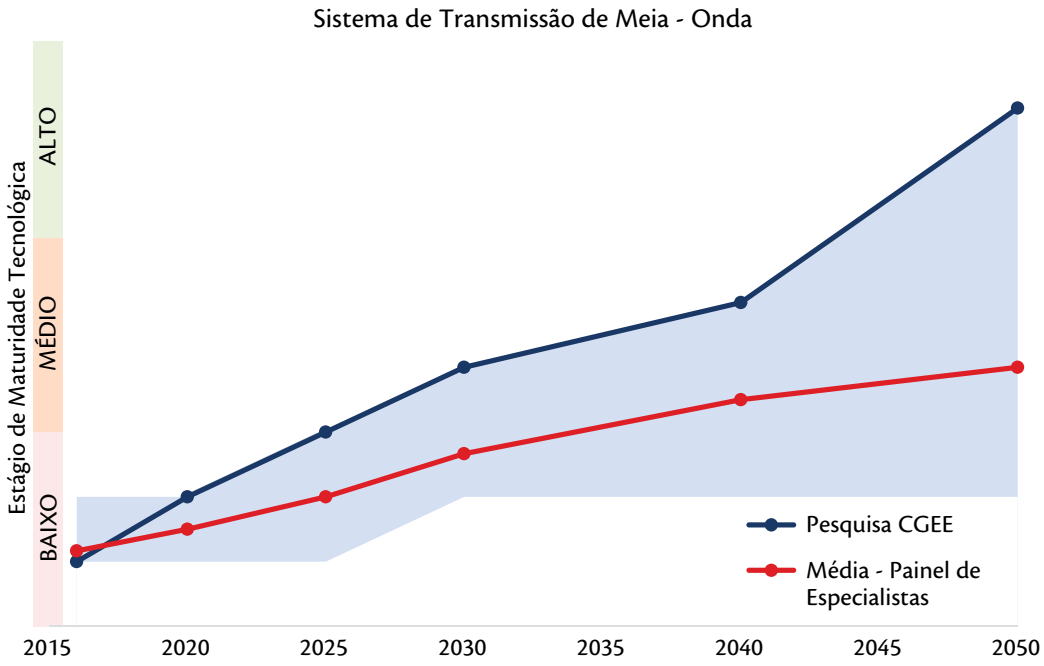

Gráfico 5 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Transmissão de Meia-onda

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Sistema de Transmissão em Circuitos Múltiplos

Transmissão em circuitos múltiplos pode ter sua aplicação mais imediata e perdurar por décadas, uma vez que é a alternativa tecnológica que minimiza os impactos ambientais em corredores restritos.

O sistema tem um grau de maturidade bem elevado, atingindo maturidade completa ao final da primeira década. A tendência da aplicação de torres com circuitos múltiplos será ditada pelas restrições socioambientais, tratando-se de uma tecnologia que pode ser desenvolvida de forma imediata, após a consolidação dos critérios de planejamento e de projeto elétrico e mecânico para a sua utilização. A maturidade da rota é representada no Gráfico 6.

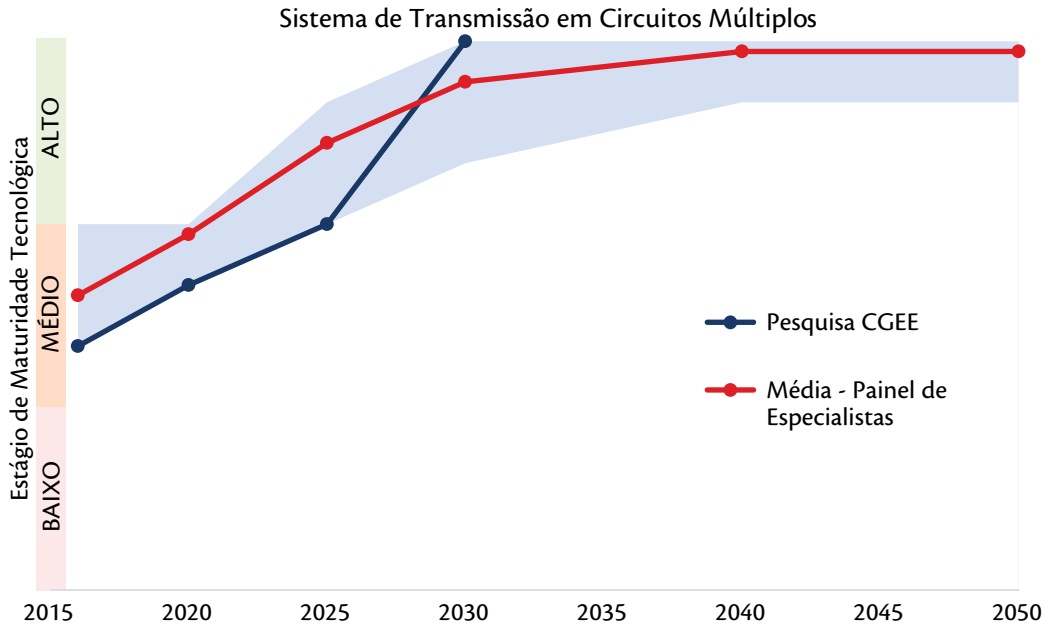

Gráfico 6 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Transmissão em Circuitos Múltiplos

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistema de Transmissão em Meia-onda e Sistema de Transmissão em Circuitos Múltiplos

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Sistema de Transmissão não Convencional	Sistema de Transmissão em Meia-onda	Fatores portadores de futuro	Dissertações de mestrado e teses de doutorado já desenvolvidas no Brasil		Disponibilidade de laboratórios para ensaios de isolamento	Estudos de sua aplicabilidade e possibilidade de uso de simuladores		
		Maturidade	BAIXO			MÉDIO		ALTO
	Sistema de Transmissão em Circuitos Múltiplos	Fatores portadores de futuro	Restrições ambientais Necessidade de um acervo técnico aprimorado		Disponibilidade de laboratórios para ensaios de isolamento	Estudos de sua aplicabilidade	Plena utilização	
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

2.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), 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 a Tabela 4.

Tabela 4 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Sistema de Transmissão em CA

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Sistema de transmissão existente com a sinalização das possibilidade de implantação de inovações tecnológicas	Sistema de transmissão convencional
2	Modelos, conceitos e critérios para a realização de estudos de planejamento da expansão do sistema	Sistema de transmissão convencional
3	Transmissão em UAT	Sistema de transmissão não convencional
4	Sistema de Transmissão em Circuitos Múltiplos	Sistema de transmissão não convencional
5	Sistema de Transmissão Multifásico	Sistema de transmissão não convencional
6	Sistema de Transmissão em Meia-onda	Sistema de transmissão não convencional

Fonte: Elaboração própria.

Para caracterizar a escolha da prioridade é apresentada uma breve fundamentação sobre cada rota.

- **Sistema de transmissão existente com a sinalização das possibilidades de implantação de inovações tecnológicas:** o objetivo é aumentar a capacidade de transmissão, com a aplicação imediata da recapacitação de linhas existentes, utilizando métodos como: aumento do nível de tensão, uso de cabos termorresistentes, conversão de linhas CA em CC etc.
- **Modelos, conceitos e critérios para a realização de estudos de planejamento da expansão do sistema:** avaliação e desenvolvimento no curto prazo das ferramentas computacionais em uso, de modo a incorporar novos modelos aderentes às tecnologias em discussão. Desenvolvimento de metodologias de planejamento com incertezas.
- **Transmissão em UAT:** transmissão em UAT em presente uso na China e em fase de implantação na Índia, tendo a Itália, EUA, Canadá, Rússia e Japão desenvolvido nas últimas décadas um conjunto de testes e pesquisas sobre o tema.
- **Sistema de Transmissão em Circuitos Múltiplos:** em uso em diversos países, destacando-se os EUA e a China. Requer profunda discussão de critérios sobre a sua aplicação e de critérios elétricos e de projeto.
- **Sistema de Transmissão Multifásico:** baixo grau de maturidade, contudo pesquisas nos EUA já foram desenvolvidas no passado, demonstrando sua exequibilidade.
- **Sistema de Transmissão em Meia-onda:** baixo grau de maturidade que requer não apenas estudos teóricos, simulações fidedignas, com o uso de modelos testados, mas também uma aplicação prática.

Capítulo 3

Capítulo 3

Macrotemática Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua (CC)

A CC permanece como uma tendência forte durante todo o horizonte, tanto para transporte para grandes blocos de energia, quanto para sistemas de menor potência em situações específicas.

3.1. Visão de futuro

3.1.1. Cenário Setorial

Sistemas de Transmissão em Corrente Contínua são os mais recomendados para a transmissão ponto a ponto, para transportar grandes blocos de potência a grandes distâncias. Em casos de geração eólica e solar, necessitaria de um sistema coletor de energia. Vale lembrar que esses sistemas usam linhas áreas em até ± 800 kV. Provavelmente, sistemas de transmissão em UATCA (1000 kV) vão concorrer com os sistemas UATCC neste caso.

Além de grandes distâncias e potências, a tecnologia de corrente contínua pode também ser aplicada em dimensões menores, quando é necessária a utilização de cabos subterrâneas ou submarinos. Pode ser usada em grandes cidades ou em áreas específicas.

Por outro lado, a exploração de petróleo no litoral brasileiro também abre portas para um mercado de transmissão submarina em ATCC, outra característica peculiar do Brasil. Estas possibilidades podem ser novas unidades de produção de gás e óleo em águas profundas ou em recapacitação de plataformas de produção existentes com menor profundidade. Nos pontos mais próximo ao litoral, uma solução em ATCA também seria factível.

O mercado de ATCC global mudou de um cenário tipo "nicho" para um cenário com um mercado estável, devido ao amplo uso em transmissão de energias renováveis. A previsão de crescimento anual (capacidade MW) do mercado global até 2022 é de 9%, enquanto a previsão de transmissão em geral é de 6%. No Brasil, o cenário ainda é de um mercado com projetos grandes, mas intermitentes, devido à dependência em desenvolvimento de blocos de geração remoto.

A tecnologia de corrente contínua está sendo usada também em configuração *back-to-back*, ou seja, sem linha ou cabo. Nesta configuração pode ser aplicada como conversor de frequência ou na mesma frequência para acoplar sistemas não síncronos. Como a maior parte dos países vizinhos do Brasil usam 50 Hz, a primeira configuração pode ser muito útil.

O uso de transmissão em CC permanece como um elemento em crescente para transportar energia de hidroelétricas remotas. O potencial uso da tecnologia de transmissão em ultra-alta tensão em corrente contínua (± 800 kV e acima) é grande.

Com o crescimento da carga em áreas metropolitanas, o uso de transmissão em corrente contínua com cabos subterrâneos pode ter aplicação significativa depois de 2020.

3.1.2. Objetivo geral

O foco principal dos investimentos em PD&I deve ser na criação de modelos computacionais e laboratoriais que representam as diversas tecnologias de um sistema de conversão CC-CA. Outro objetivo, não menos importante, é o aumento da produção nacional de equipamentos e componentes para a aplicação da tecnologia de conversão. Porém, para que haja esse crescimento, faz-se necessário o desenvolvimento de políticas industriais, instalações laboratoriais e capacitação de recursos humanos.

3.1.3. Objetivo específico

Curto prazo (2017-2020):

Em curto prazo, ou seja, de 2017 a 2020, os objetivos são relacionados ao planejamento e à preparação para sistemas de Alta Tensão em Corrente Contínua (ATCC).

- Mitigação dos problemas associados com o efeito *multi-infeed*, quando temos múltiplos elos do tipo LCC operando na mesmo região elétrica;
- Modelagem dos elos ATCC do tipo VSC em ferramentas computacionais, em programas tipo *Electromagnetic Transient* EMT e frequência fundamental;
- Ter os requisitos técnicos e comerciais para a fabricação de transformadores conversores em tensões acima de 600 kV CC;
- Ter os requisitos técnicos e comerciais para reduzir as dimensões e o peso de transporte de transformadores conversores para atender as regiões do Brasil;
- Metodologia consolidada para a escolha do local e do projeto dos eletrodos do sistema de CC, tanto terrestre quanto marítimo.

Médio prazo (2020-2030):

Neste período, pode-se pensar em maneiras de aplicação de ATCC e de fabricação/montagem de componentes no Brasil. Nota-se que o uso de VSC terá crescimento significativo. Neste sentido, deve-se ter:

- Metodologias para análise do efeito *multi-infeed*, quando da existência de múltiplos elos do tipo LCC operando na mesma região elétrica com elos do tipo VSC;
- Modelagem dos elos ATCC do tipo VSC em ferramentas computacionais, em programas tipo EMT e frequência fundamental, para uso em redes de ATCC, possivelmente com alterações de controle, uso de configurações mais complexas de conversão e disjuntores CC;
- Aplicação dos elos ATCC híbridos (LCC+VSC), para uso em redes com linhas aéreas e cabos subterrâneos. Considerações no uso de disjuntor CC ou de conversores capazes de interromper corrente;
- Identificação das necessidades para a fabricação e para o teste de conversor tipo VSC em capacidades compatíveis com a tecnologia LCC;
- Ter instalações industriais capacitadas para a produção e para o teste de transformadores em sistemas VSC.

Longo prazo (2030-2050):

Em longo prazo, ou seja, entre 2030 e 2050, o objetivo a ser alcançado é:

- Uso de novos semicondutores em conversores, tais como carboneto de silício (SiC) ou arsenieto/nitrido de gálio.

3.1.4. Fundamentação

Está prevista uma expansão hidroelétrica de 172 GW até 2040, que, de acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), deve acontecer com 105 GW na bacia do Amazonas e com 18 GW na bacia Tocantins/Araguaia. Este total de 123 GW está dividido em sub-bacias: a do Tapajós tem 25 GW e as do Xingu e do Madeira ainda têm 17 GW a desenvolver. Este total de 42 GW seria bem atendido pelos elos de UATCC em ± 800 kV, com até 8 GW por bipolo. As sub-bacias na margem esquerda (norte) do rio Amazonas, como a do rio Trombetas, têm um total de aproximadamente 10 GW, que podem usar ± 1100 kV se for diretamente para São Paulo, mas o regime hidrológico deve favorecer a integração com os sistemas existentes.

UATCC em ± 800 kV, com até 8 GW por bipolo, atende bem às necessidades de transmissão a longa distância no Brasil. Já a UATCC em ± 1100 kV, com até 12 GW por bipolo, está em construção na China, mas a sua aplicação no Brasil não parece favorável nos cenários estudados. Nota-se que a tensão de ± 1100 kV está no limite de uso em linhas aéreas, por causa da necessidades de nível para a isolação em ar. No Brasil, a potência adequada para um bipolo de UATCC depende das caraterísticas sistêmicas, especialmente quanto às consequências da perda de um bipolo em plena carga. Além dos devidos limites das caraterísticas sistêmicas elétricas, também tem um limite imposto pela infraestrutura de transporte, em consequência das dimensões e do peso de transformardes conversores.

Caso a demanda por energia elétrica no Brasil siga a tendência atual, com a região Sudeste com uma grande concentração de carga, proprícia a receber vários elos de CC, o que vai caracterizar uma situação de *multi-infeed*. Esta concentração torna necessário realizar estudos e a mitigação de efeitos devido às múltiplas entradas de ATCC com tecnologia LCC. A tendência ao uso de conversores VSC em potências e tensões crescentes, esses efeitos seriam menores, porém, no período mais curto, as consequências de elos múltiplos são área de estudo pertinente.

3.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática 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 de tempo até 2050 (ver Anexo).

A métrica aplicabilidade econômica prevê a utilização de blocos de potência remotos, a entrada em cidades congestionadas e a cooperação internacional como horizonte.

A métrica desenvolver equipamentos nacionais tem como pilar a definição de equipamentos a serem nacionalizados.

A métrica convivência das diferentes tecnologias não influencia os modelos de planejamento e operação.

A entrada de técnicas de armazenamento de energia é uma métrica que verifica o nível de inserção dessa tecnologia.

A métrica geração intermitente e de baixa despachabilidade já é uma realidade em curto prazo e deverá ser mitigada com a entrada de dispositivos de armazenamento de energia.

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. De uma forma geral:

- Na questão econômica, a viabilidade de um projeto de transmissão leva em consideração preços que tenham uma grande influência de encargos tributários, junto com os empréstimos financeiros necessários;
- Na questão regulatória, a implementação de novas tecnologias está sendo retardada pelo sistema tanto nos prazos de implementação e teste, quanto na aplicação de "multas" durante o período de aprendizagem;
- Na questão socioambiental, o uso de ATCC deve ter uma vantagem devido à menor faixa de servidão necessária, em termos de potência transmitida ou possível uso de cabos subterrâneos, quando comparado ao uso de ATCA.

3.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas

Neste item são abordados os *Roadmap*s tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), os *Roadmap*s 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.

3.3.1. Temática transmissão em corrente contínua (CC)

Rota - Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Corrente Contínua

Os assuntos que suportam a rota seguem:

- Avaliação operacional das falhas de comutação das inversoras CC na rede CA e demais sistemas CC;
- Otimização dos sistemas de controle CC e CA para amortecimento de pequenas oscilações e estabilidade no SIN;
- Desenvolvimento das interligações dos sistemas CC para formação de suas redes multiterminais;
- Estudos dos riscos da expansão da rede CA, com a diminuição de sua impedância equivalente entre as inversoras CC, com possíveis ressonâncias harmônicas e sobretensões;
- Estudos da modelagem dos sistemas de controle de velocidade (frequência) e tensão de usinas associadas aos sistemas de controle CC do SIN, com iterações dos elos CC em *multi-infeed*;
- Operação dos sistemas CC em *multi-infeed* com baixa capacidade;
- Estudo de interação dos componentes Facts, seus efeitos sistêmicos, e na configuração CC *multi-infeed*;
- Desenvolvimento de sistema de controle *master* para controle de frequência no SIN e participação coordenada nos elos de CC.

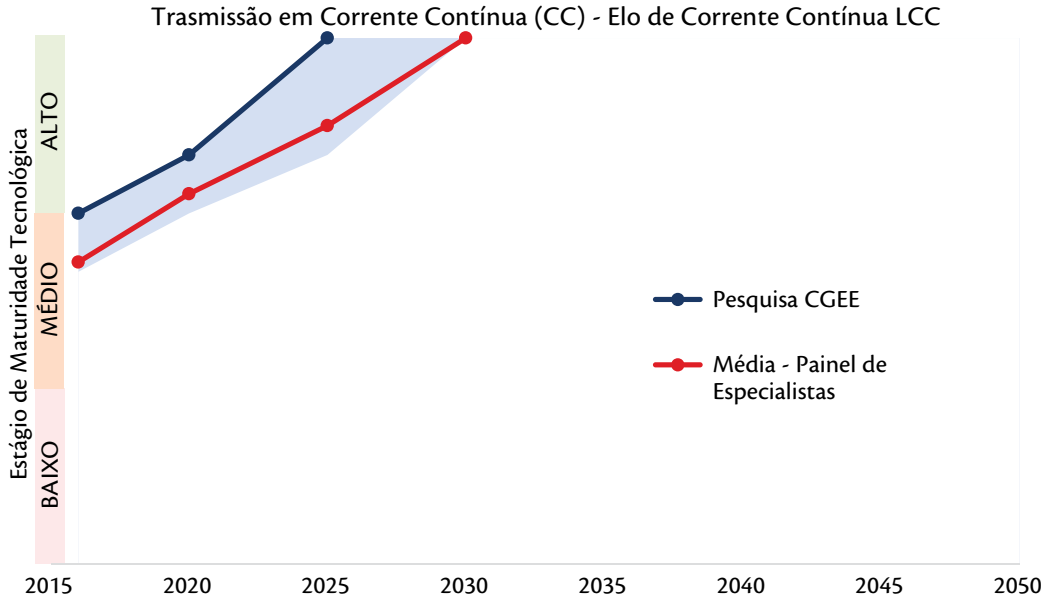

Gráfico 7 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Corrente Contínua LCC

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Tensão Contínua

Os assuntos que suportam a rota seguem:

- Estudos sobre disjuntores CC e outros equipamentos para uso da tecnologia Modular Mutilevel Converter CC (MMC-CC). Sistemas híbridos de diferentes tecnologias, conversor LCC e MMC-CC;
- Desenvolvimento de conversores CC/CC para a conexão de elos de corrente (LCC) e de tensão (VSC) contínuos, para expansões de parques eólicos;
- Pesquisas nas redes CC multiterminais sobre a capacidade de emulação de inércia virtual (Synchronverter) nas interligações com a rede CA;
- Estudo da expansão do SIN considerando os elos CC com tecnologia MMC-CC, avaliação do impacto da geração intermitente no desempenho de elos de corrente contínua, implantação do Facts para mitigar o restabelecimento após contingências e desligamentos.

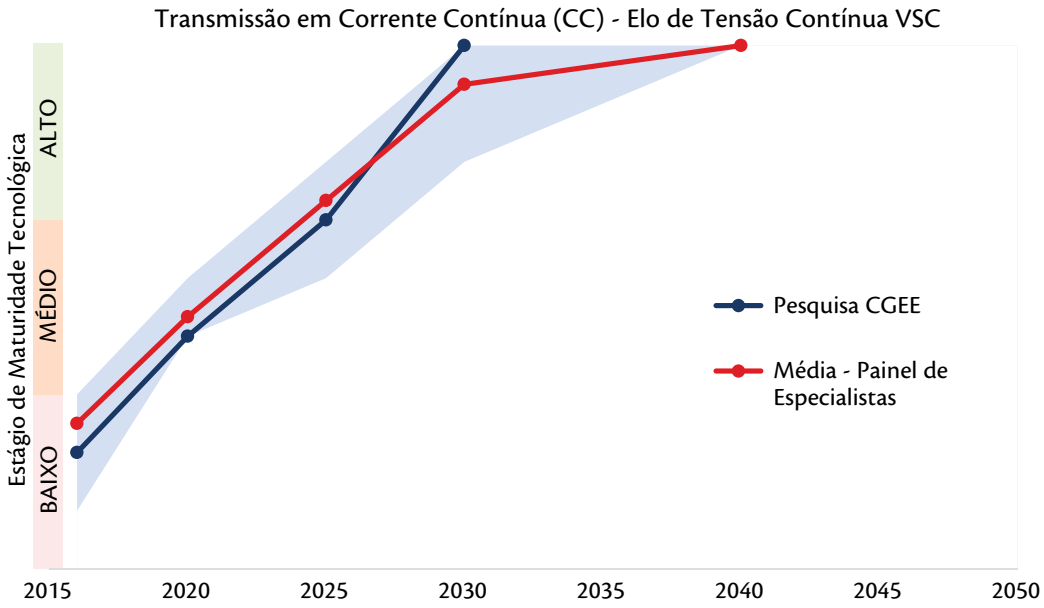

Gráfico 8 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Tensão Contínua VSC

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Transmissão em Corrente Contínua

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Transmissão em Corrente Contínua (CC)	Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Corrente Contínua	Fatores portadores de futuro	Melhoria do índice de perda, diminuição de custo e aumento de confiabilidade			Integração LCC-VSC e multi infeed		
		Maturidade	MÉDIO	ALTO				
	Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Tensão Contínua	Fatores portadores de futuro	Novos materiais mitigando o custo econômico			Integração LCC-VSC e multi infeed Investimento em disjuntores		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

3.3.2. Temática equipamentos e instalações de alta tensão aplicados a sistemas CC

Rota - Conversores CA/CC - Fonte de Corrente (CSC)

Os assuntos que suportam a rota seguem:

- Desenvolvimento de transformadores conversores aplicados a Elos CC de corrente (conversores LCC), tendo como foco os materiais e os aspectos construtivos locais.

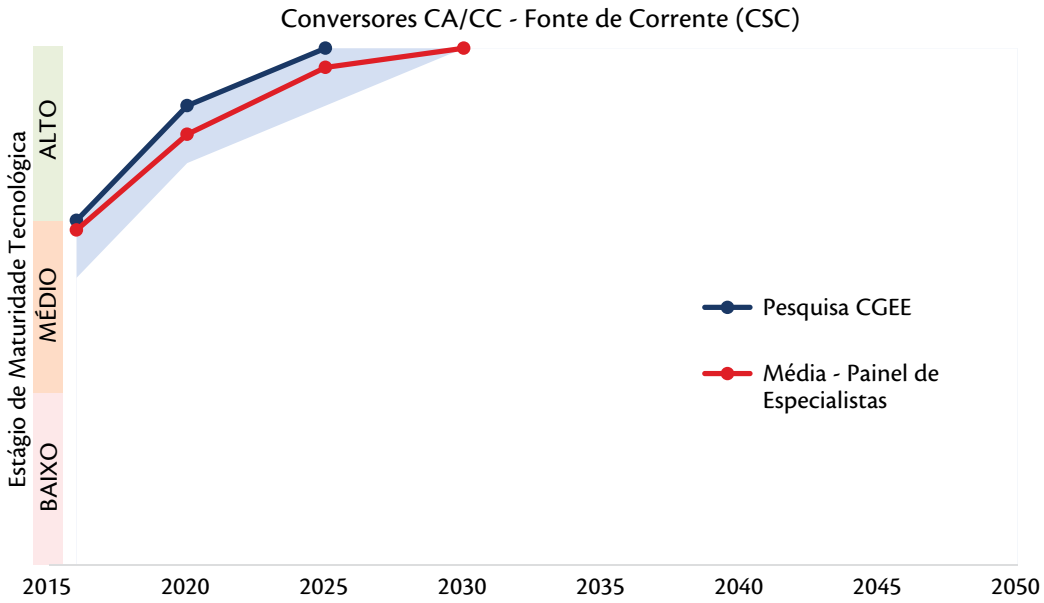

Gráfico 9 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores CA/CC - Fonte de Corrente (CSC) LCC

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Conversores CA/CC - Fonte de Tensão (VSC)

Os assuntos que suportam a rota seguem:

- Desenvolvimento de novas topologias e controladores dos conversores VSC e conversores multinível (MMC), e seus equipamentos de média tensão.

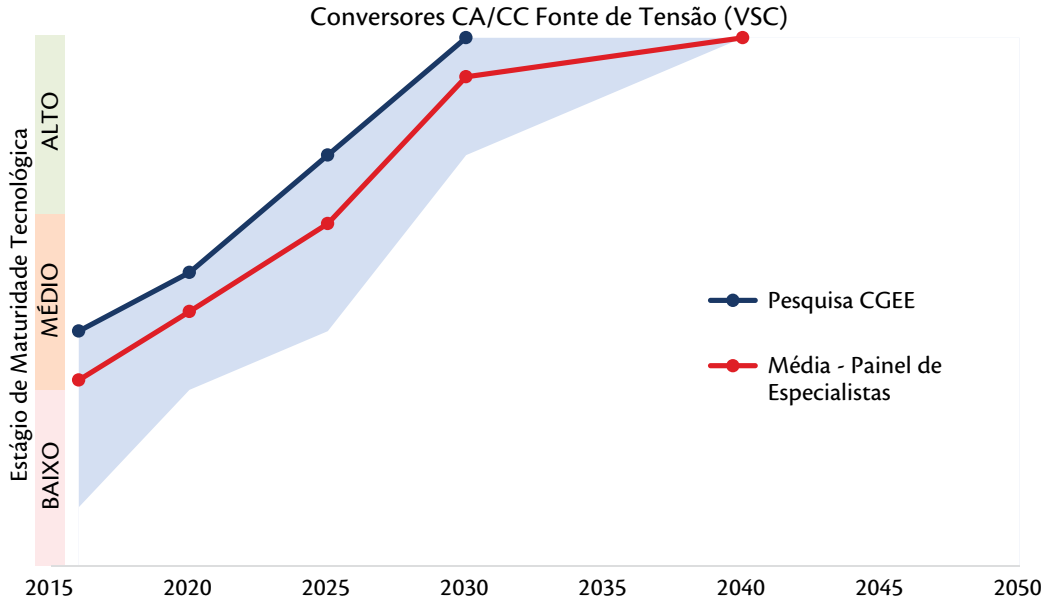

Gráfico 10 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores CA/CC Fonte de Tensão (VSC)

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas
Conversores CA/CC Fonte de Tensão (VSC)

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Equipamentos e Instalações de Alta Tensão Aplicados a Sistemas CC	Conversores CA/CC - Fonte de Corrente (CSC)	Fatores portadores de futuro	Otimização dos custos dos transformadores					
		Maturidade	ALTO					
	Conversores CA/CC - Fonte de Tensão (VSC)	Fatores portadores de futuro	Aprimoramento do controle de disparo		Tentativa de sistemas híbridos LCC- VSC			
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Novas tecnologias de equipamentos para transmissão em CC

Os assuntos que suportam a rota seguem:

- Desenvolvimento de disjuntores (CC) e transformadores CA/CC visando a materiais e aspectos construtivos;
- Otimização dos filtros harmônicos do sistema CA/CC para a aplicação como filtros ativos em parques eólicos;
- Desenvolvimento de válvulas com semicondutores de SiC para VSC.

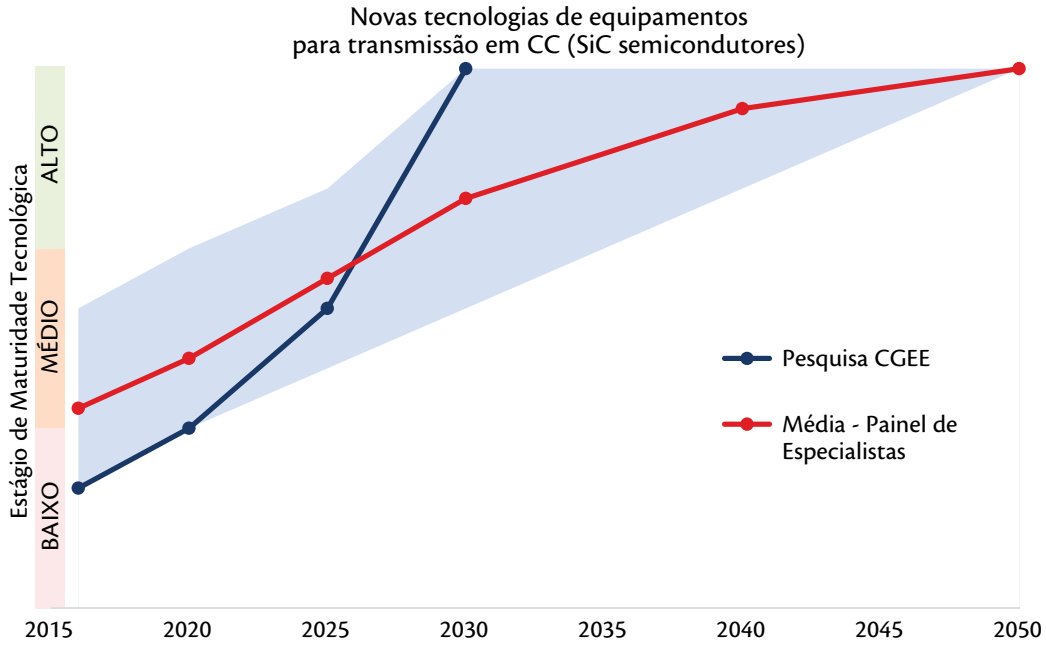

Gráfico 11 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias de Equipamentos para Transmissão em CC

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Eletrodos para sistema de transmissão em CC

Os assuntos que suportam a rota seguem:

Inovação para os eletrodos terrestres e marítimos quanto ao desgaste e às influências ambientais.

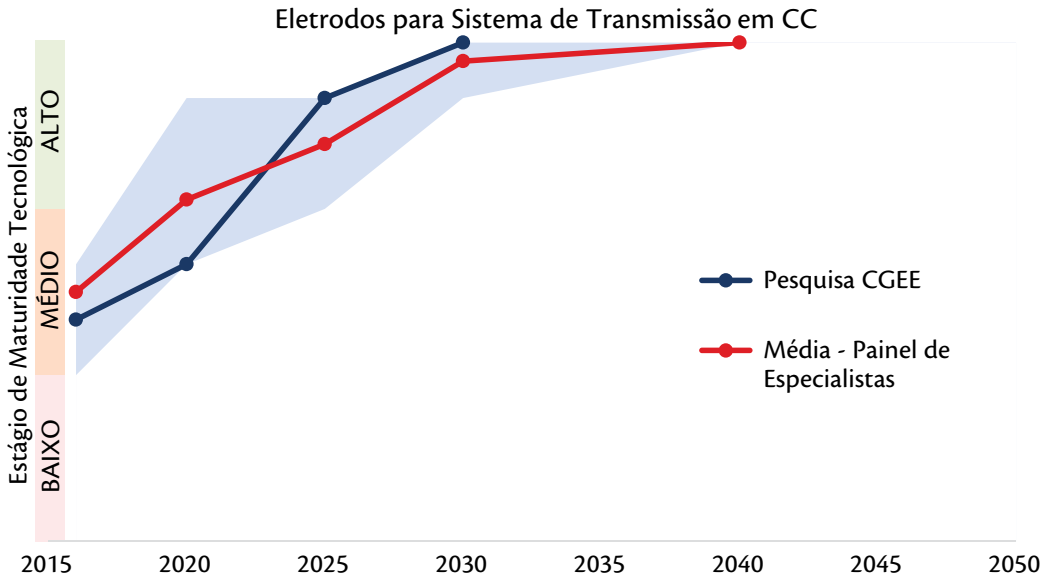

Gráfico 12 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Eletrodos para Sistema de Transmissão em CC

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 Eletrodos para Sistema de Transmissão em CC e Novas Tecnologias de Equipamentos para Transmissão em CC

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Equipamentos e Instalações de Alta Tensão Aplicados a Sistemas CC	Novas Tecnologias de Equipamentos para Transmissão em CC	Fatores portadores de futuro	Obtenção dos resultados das pesquisas das novas tecnologias para aprimorar a eficiência dos sistemas CC			Implementação dos resultados com proficiência no transporte de grandes blocos de energia		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		
	Eletrodos para sistema de transmissão em CC	Fatores portadores de futuro	Estudos para a comparação dos eletrodos convencionais com os eletrodos metálicos face à influência ambiental e operacional		Estudos para a integração de eletrodos em bipolos separados visando aos custos e à mitigação dos efeitos ambientais			
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			

Fonte: Elaboração própria.

3.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia(ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), 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 8.

Tabela 8 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Sistema de Transmissão em Corrente Contínua (CC)

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Eletrodos para sistema de transmissão em CC	Equipamentos e Instalações de Alta Tensão Aplicados a Sistemas CC
2	Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Corrente Contínua	Transmissão em Corrente Contínua (CC)
3	Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Tensão Contínua	Transmissão em Corrente Contínua (CC)
4	Conversores CA/CC - Fonte de Tensão (VSC)	Equipamentos e Instalações de Alta Tensão Aplicados a Sistemas CC
5	Conversores CA/CC - Fonte de Corrente (CSC)	Equipamentos e Instalações de Alta Tensão Aplicados a Sistemas CC
6	Novas Tecnologias de Equipamentos para Transmissão em CC	Equipamentos e Instalações de Alta Tensão Aplicados a Sistemas CC

Fonte: Elaboração própria.

Fundamentado nos custos e nas dificuldades ambientais, deve-se fomentar estudos e pesquisas na operação de falha monopolar, com necessidade de utilização de retorno metálico ou por eletrodo. É sabida a dificuldade de obtenção de áreas de eletrodo adequadas do ponto de vista técnico e econômico.

As tecnologias na conversão de corrente e de tensão nos sistemas de corrente contínua sempre estarão no encalço da melhor relação custo-benefício função, do montante a ser despachado, distâncias envolvidas e tecnologias de ponta.

O desenvolvimento de sistemas de corrente constante no CC poderá ser viável para as cargas futuras com estabelecimento de regulação apropriada.

Os disjuntores de corrente contínua, ainda continua sendo o grande desafio a ser estabelecido, com provável otimização futura dos controles de disparo de válvulas.

Capítulo 4

Capítulo 4

Macrotemática Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados

A macrotemática é multidisciplinar na concentração da engenharia de aplicação com grande densidade de mecânica do meio contínuo e tecnologia dos materiais. Todas as demais engenharias são úteis, sobretudo a de produção, que trata da pesquisa operacional. Tudo sob a vigilância do método científico (filosofia da ciência).

A macrotemática é fundamentalmente dependente de materiais e, portanto, deve estar associada a um grande número de temáticas, pois tudo o que estiver sendo tratado pelas engenharias depende dos materiais.

4.1. Visão de futuro

4.1.1. Cenário setorial

A transmissão subterrânea somente é feita quando não existe nenhuma possibilidade de ser feita por meio de transmissão aérea (onde o isolante é o próprio ar). De modo geral, a transmissão subterrânea está confinada nos grandes centros urbanos, onde uma linha aérea não consegue faixa de passagem. Os terrenos são muitos caros. Em tensão acima de 69 kV, qualquer linha subterrânea é mais barata que uma linha aérea equivalente, se a comparação for financeira e a concessionária tiver que comprar o direito de passagem. Os órgãos públicos são refratários à construção de linhas aéreas em áreas urbanas. A interferência eletromagnética é um grande empecilho para a construção destas linhas.

4.1.2. Objetivo geral

O objetivo geral desta macrotemática é desenvolver sistemas de transmissão por cabos isolados com melhores características dielétricas, alta confiabilidade, maior vida útil, perdas reduzidas, menores custos de construção, operação e manutenção, atendendo ao meio ambiente, às especificidades do mercado e à segurança.

4.1.3. Objetivo específico

Curto Prazo (2015-2020)

Para os sistemas de Cabos Isolados, atualmente, o Brasil não possui pesquisas relevantes na área que possam trazer resultados específicos em tão curto prazo. Estima-se que as análises realizadas em PD&I tragam resultados satisfatórios para o desenvolvimento dessa área no País, porém, a maioria desses resultados terá os objetivos alcançados em médio e longo prazo. Em virtude disso, conclui-se que não há objetivos específicos em curto prazo para este tema.

Médio Prazo (2020-2030)

Em médio prazo, ou seja, de 2020 a 2030, será necessário o desenvolvimento de PD&I a fim de permitir uma evolução para atingir os seguintes objetivos:

- Avaliação de vida útil remanescente dos parques existentes em cabos isolados;
- Modelos físicos para estudar a vida dos dielétricos;
- Métodos e critérios de operação de cabos isolados por ampacidade;
- Material dielétrico com menor custo;
- Novos materiais para infraestrutura civil em instalações subterrâneas;
- Metodologia técnico-econômica para modelagem e precificação de sistemas por cabos isolados.

Longo Prazo (2030-2050)

Em longo prazo, ou seja, entre 2030 e 2050, sabe-se que haverá a necessidade de desenvolvimento de novos materiais para a aplicação em cabos isolados. Assim, teremos como objetivos específicos:

- Novos materiais para condutores;
- Novos materiais para dielétricos.

4.1.4. Fundamentação

No Brasil, as indústrias com capacidade de fazer pesquisa tecnológica são empresas transnacionais. Estas empresas conduzem pesquisas tecnológicas nos seus países de origem ou na China, que possui política de fomento para este tipo de atuação.

Alguns dos objetivos vinculados são serviços de engenharia que uma empresa líder deve realizar para se manter na cadeia produtiva. Estes mesmos itens, mesmo com muita boa vontade do órgão regulador, deveriam ser considerados engenharia básica.

Quando se faz engenharia básica existe uma tênue esperança de que ao longo do trabalho alguma ação venha a exigir desenvolvimento tecnológico. O agente de fomento de pesquisa somente poderia cogitar um aporte de capital se houvesse a contrapartida de que trata a proposição do item.

Os objetivos de longo prazo podem ser resumidos em um único "novos materiais".

Novos materiais condutores esbarram no modelo cosmológico dos elementos do quadro periódico. O melhor condutor elétrico é o cobre e o melhor condutor elétrico economicamente viável é o alumínio. Podemos então concluir que de um ponto de vista natural (cosmológico) já atingimos o limite (da natureza). Portanto, novo material condutor significa material supercondutor e supercondutores na temperatura de 77 k (liquefação do nitrogênio). O Brasil tem grandes reservas de terras raras que são os elementos químicos indispensáveis para este tipo de supercondutividade. É recomendável que exista um grande aporte financeiro para reduzirmos o *gap* tecnológico nesta área. Mais recursos financeiros significam mais protagonistas aportando estes recursos.

Novos materiais dielétricos (isolantes elétricos) necessitam, de modo imperioso, da termodinâmica e da nanociência. E nestas duas áreas o *gap* tecnológico do Brasil é abissal.

A termodinâmica é a área em que se pode chegar a alguma inovação com os conhecimentos que teremos na atualidade e observa-se que o horizonte é até 2050.

O que seria um futuro de 2050 com a termodinâmica? O material isolante elétrico funciona com polarização e relaxação. Em CC, o mecanismo de funcionamento de um material isolante elétrico (dielétrico) é substancialmente a polarização. Todavia em condições de curto e surto têm-se sempre os dois (polarização e relaxação). Estes dois fenômenos eletromagnéticos são inerentes à estrutura dos materiais quando estimulada por um campo elétrico. Estes dois fenômenos são estudados, tratados e dominados pela termodinâmica.

Todo material isolante elétrico deve prover as melhores condições de polarização e relaxação. A energia necessária para um material elétrico polarizar com ou sem relaxação é metrificada pelo ângulo de perdas. Em CC, a perda decorre somente por condução elétrica no material, por isso, as perdas em CC são muito baixas. Em CA, o material elétrico deve polarizar e (despolarizar por reversão do campo) relaxar, ocorrendo então valores de perdas (de energia) muito maiores.

Qualquer material isolante elétrico de grande rigidez dielétrica (como nos cabos isolados para alta tensão) deve ser bom polarizador e bom relaxador (como os antigos cabos isolados em papel impregnado). Os materiais isolantes elétricos modernos (tipo xlpe) não conseguem ser tão bons polarizadores e relaxadores. Por isso, eles desenvolvem mecanismos de degradação dielétrica (tipo *treeing*) em tempos muito menores que os antigos cabos em papel impregnado.

O futuro dos materiais isolantes elétricos (dielétricos) no domínio da termodinâmica deve excogitar materiais que os fenômenos de relaxação e polarização permitam trabalhar com elevada rigidez dielétrica e baixas perdas.

A nanociência é a propedêutica da nanotecnologia. A nanotecnologia também é regida pela termodinâmica, mas agora o meio contínuo é muito mais organizado, pois este é o objetivo da nanociência: trabalhar o material no nível nanomolecular, de modo a reduzir a desorganização dos materiais que, na escala nano, é muito mais fácil de ser dominada.

A nanociência é o atual limite das ciências dos materiais.

4.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Os itens a seguir apresentam premissas de cunho geral que irão permear pela macrotemática, considerando-se os aspectos:

- Crescimento do PIB;
- Crescimento da População;
- Crescimento da Demanda.

Crescimento do PIB

O PIB brasileiro tem sofrido grandes oscilações ao longo dos últimos 30 anos. A era hiperinflacionária respondeu por muitas dessas oscilações. Depois do Plano Real houve um momento de crescimento baixo - cerca de 3%, enquanto os demais BRICS cresciam em taxas superiores a 5%; e a China, a 12% a.a.

Crescimento da População

A população brasileira tem diminuído muito a taxa de natalidade. Atualmente, o prognóstico é que devemos trabalhar com uma taxa de natalidade inferior a um filho por casal.

Crescimento da Demanda

A EPE tem dados muito relevantes em relação ao crescimento da demanda de energia elétrica até 2024.

4.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas

Neste item, são abordados os *Roadmap*s tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), os *Roadmap*s 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 rotas tecnológicas e os respectivos gráficos de evolução da maturidade, acompanhados dos fatores portadores de futuro.

4.3.1. Temática sistemas de transmissão por cabos isolados

Roadmap tecnológico

Rota - Metodologias para concepção e dimensionamento de linhas subterrâneas

Nesta rota não foram apresentados os problemas de dimensionamento dos cabos e acessórios, mas foram assinaladas as necessidades de determinar a vida esperada para os cabos já instalados, com ênfase especial no dimensionamento econômico das trincheiras econômicas e materiais de enterramento dos cabos e de modo relevante para os métodos não destrutivos que requerem aberturas de valas a céu aberto. O Gráfico 13 apresenta a evolução da maturidade da rota.

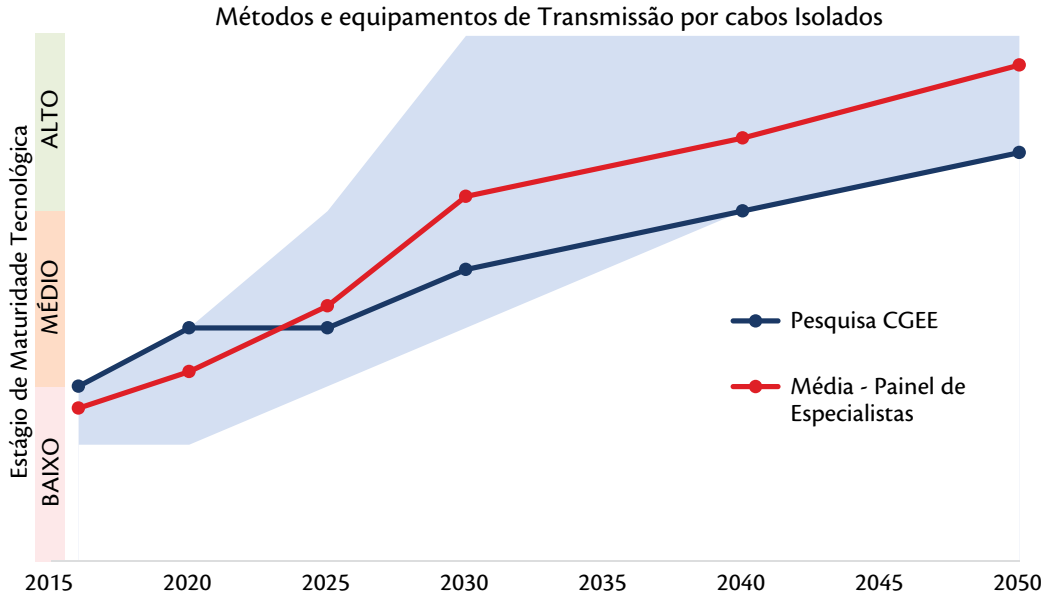

Gráfico 13 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Métodos e Equipamentos de Transmissão por Cabos Isolados

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Variáveis ambientais que Impactam no Dimensionamento das Linhas Subterrâneas

Uma linha de transmissão subterrânea está submetida a várias restrições ambientais:

- Regulação dos órgãos municipais;
- Obras civis de longa duração;
- Materiais especiais para reaterro das trincheiras;
- Materiais para a fixação dos cabos quando eles emergem do solo;
- Interferência com outros serviços subterrâneos;
- Interferência eletromagnética;

As variáveis ambientais permeiam a macrotemática de linhas de transmissão subterrânea em qualquer tempo (além até mesmo do horizonte de 2050). Esconder os cabos de danos e furtos é a maior preocupação dos projetistas e instaladores. Deixar os cabos bem acomodados em terrenos que

dissipam adequadamente o calor gerado pelos próprios cabos é o objetivo do controle das variáveis ambientais. A evolução do grau de maturidade tecnológica pode ser observada no Gráfico 14.

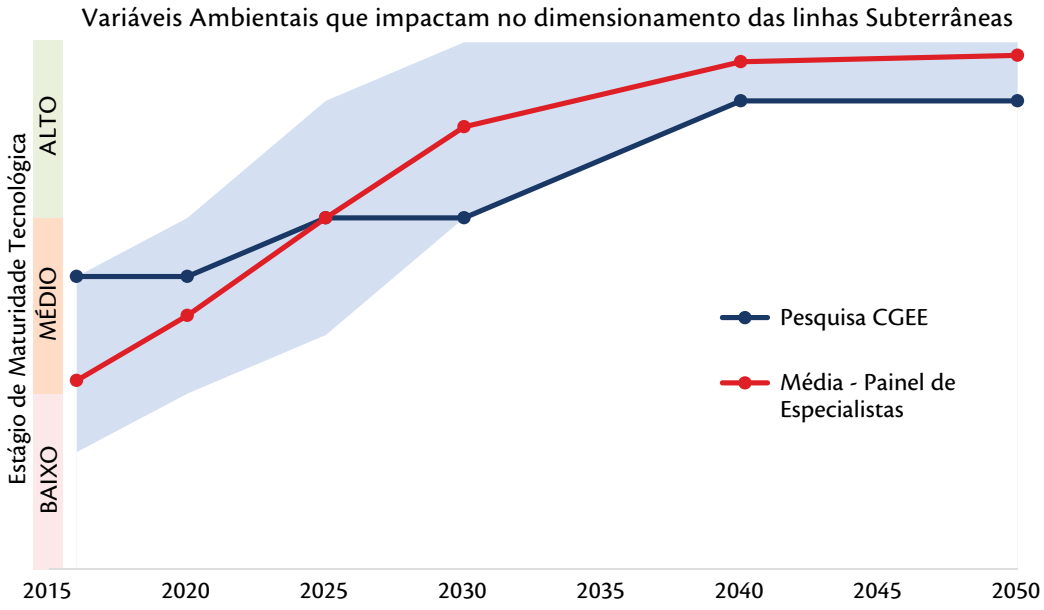

Gráfico 14 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Variáveis Ambientais que Impactam no Dimensionamento das Linhas Subterrâneas

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Cabos isolados e acessórios

Esta rota é talvez aquela de maior importância para o Setor Elétrico do Brasil, sendo aquela dominada pelos fabricantes transnacionais de cabos e acessórios. Porém existe uma deficiência de produção de cabos atualmente no País, havendo uma quantidade limitada de fabricantes desses cabos (até 138 kV). A maioria das transnacionais trazem cabos e acessórios produzidos fora do Brasil. A evolução da rota em âmbito nacional pode ser observada no Gráfico 15.

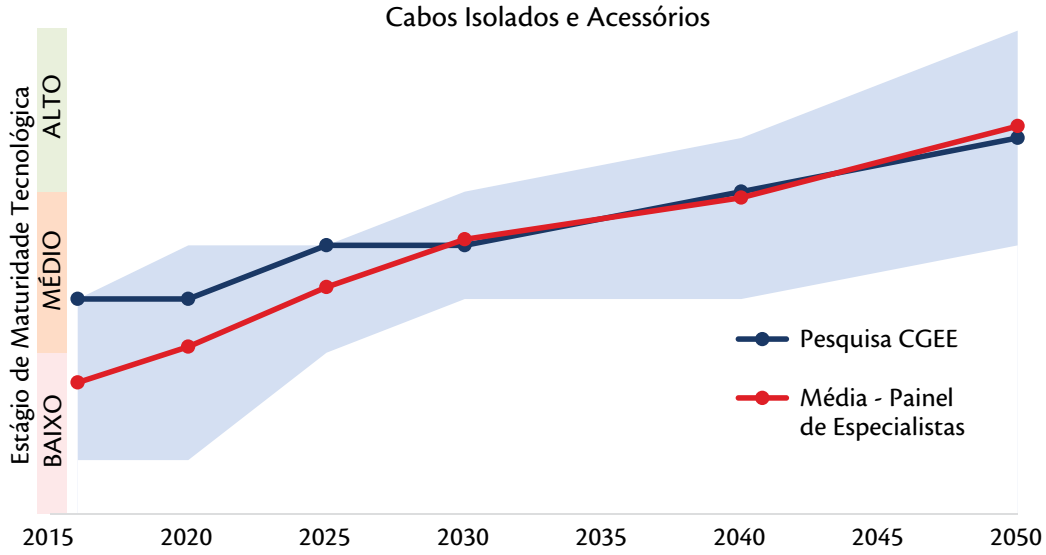

Gráfico 15 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Cabos Isolados e Acessórios

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Métodos e equipamentos da transmissão por cabos isolados

Os métodos usados nas linhas de transmissão subterrânea são muito mais simples do que aqueles usados em linhas de transmissão aérea. Também os equipamentos, exigindo assim um menor esforço. A evolução desta rota é representada no Gráfico 16.

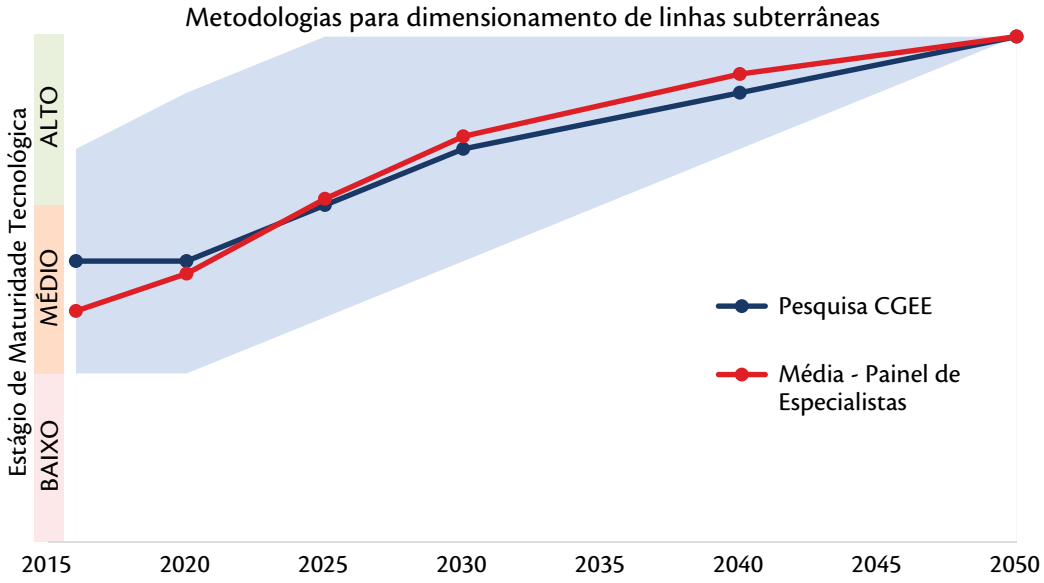

Gráfico 16 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Metodologias para dimensionamento de linhas subterrâneas

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 Métodos e Equipamentos de Transmissão por Cabos Isolados/ Cabos Isolados e Acessórios/ Variáveis Ambientais que Impactam no Dimensionamento das Linhas Subterrâneas e Metodologias para a Concepção e o Dimensionamento de Linhas Subterrâneas

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados	Metodologias para concepção e dimensionamento de linhas subterrâneas	Fatores portadores de futuro	Engenharia básica.			Novos materias (condutores e isolantes elétricos)		
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
	Variáveis Ambientais que impactam no dimensionamento das linhas Subterrâneas	Fatores portadores de futuro	Pesquisa de otimização objetivando reduzir o custo de transmissão.					
		Maturidade	MÉDIO				ALTO	
	Cabos Isolados e Acessórios	Fatores portadores de futuro	Cadeia Produtiva Nacional. Fatores de ordem econômica e financeira.					
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO				ALTO
	Métodos e Equipamentos da transmissão por cabos isolados	Fatores portadores de futuro	Cadeia Produtiva Nacional. Fatores de ordem econômica e financeira.					
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO				ALTO

Fonte: Elaboração própria.

4.3.2. Temática materiais e tecnologias emergentes

Roadmap tecnológico

Rota - Materiais

Os materiais condutores tradicionais (cobre e alumínio) podem ser considerados maduros e o agregado tecnológico está na redução de perdas Joule. Nos materiais supercondutores temos um *gap* tecnológico abissal.

É uma rota com muita dificuldade, mas é aquela que define a fronteira tecnológica para as linhas de transmissão subterrâneas. A evolução da maturidade tecnológica da rota é representada no Gráfico 17.

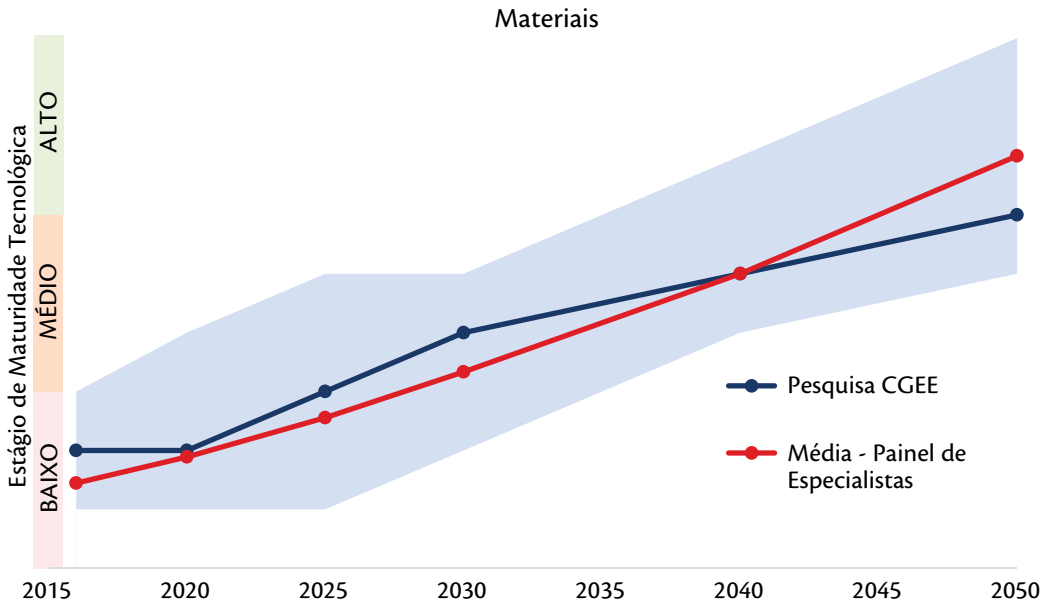

Gráfico 17 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Materiais

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade da respectiva rota são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Materiais

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Materiais e Tecnologias Emergentes	Materiais	Fatores portadores de futuro	Necessidade de recursos humanos, infraestrutura e aporte financeiro			Interação com as empresas		
		Maturidade	BAIXO			MÉDIO		

Fonte: Elaboração própria.

4.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), essa priorização é o resultado de uma anpalise realizada porum 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 para as rotas abordadas na macrotemática Sistema de Transmissão por Cabos Isolados

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Metodologia para a concepção e o dimensionamento da LT Subterrânea	Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados
2	Variáveis ambientais	Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados
3	Cabos isolados e acessórios	Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados
4	Métodos e equipamentos de transmissão por cabos isolados	Sistemas de Transmissão por Cabos Isolados
5	Materiais	Materiais e Tecnologias Emergentes

Fonte: Elaboração própria.

Prioridade 1- Metodologia para a concepção e o dimensionamento de LT subterrânea

Esta prioridade reflete o estado da atividade de engenharia nas concessionárias e nas empresas no Brasil. No princípio, a decisão das empresas foi orientada por redução de custos, sendo posteriormente mantida como uma forma de gerar caixa através de redução deste custo.

Prioridade 2 - Variáveis Ambientais

Na esteira da Prioridade 1, estas também são, na sua maioria, atividades de engenharia assistida com esforço de *trouble shooting*.

Prioridade 3 - Cabos Isolados e Acessórios

Ainda não existe fabricante de matriz nacional com capacidade de enfrentar esta prioridade. Se não tiver empenho da indústria nacional, será totalmente inútil aportar esforço de pesquisa nesta prioridade.

Prioridade 4 - Métodos e Equipamentos da Transmissão por Cabos Isolados

Da mesma forma que nas prioridades 1 e 2, esta também deveria, em sua maioria, ser atividade de engenharia dentro de cada negócio.

Prioridade 5 - Materiais

Apesar de estar na quinta (última) prioridade, o Brasil tem um potencial muito grande para ser protagonista internacional em 2050 na área de materiais condutores e dielétricos (também outras aplicações). Todavia a cadeia produtiva para este negócio é muito abrangente e muito especializada. Esta prioridade depende muito do envolvimento das universidades e centros de pesquisa tecnológica.

Capítulo 5

Capítulo 5

Macrotemática Sistemas Flexíveis de Transmissão em Corrente Alternada (Facts)

O conceito Facts surgiu a partir da utilização da tecnologia de eletrônica de potência aplicada a controladores estáticos com finalidade de controlabilidade de transferência de potência.

Assim, os dispositivos Facts se constituem nos equipamentos de compensação série e paralela de reativos, utilizando componentes semicondutores de alta potência, que se tornam capazes de controlar grandezas elétricas como impedância, fluxo de potência, estabilidade e da capacidade de transporte.

Neste contexto, foi feito o levantamento das informações na qual o assunto em pauta foi dividido em macrotemáticas, temáticas, rotas tecnológicas e linhas de PD&I.

As temáticas identificadas nesta macrotemática foram:

- Compensadores em paralelo;
- Compensadores de potência reativa em série e paralelo-série;
- Controle e interação de equipamentos Facts;
- Estudos e modelos para aplicação de Facts.

Verificou-se existir competência para serem desenvolvidas as rotas tecnológicas a partir da formação de parcerias nacionais e internacionais tanto entre empresas, quanto entre agentes e instituições de pesquisa. A cadeia produtiva deve ser incentivada e ampliada na medida em que as tecnologias dos conversores, tiristores, controles e filtros são essencialmente importadas. À medida que os leilões de fontes renováveis como a solar e a eólica aumentarem, o mercado se tornará mais viável, com a instalação de fábricas de componentes eletrônicos, produção de novos desafios em termos operacionais.

5.1. Visão de futuro

5.1.1. Cenário setorial

Os dispositivos Facts possuem grande campo de aplicação, sobretudo considerando-se a evolução e a transformação pelas quais os sistemas elétricos de potência estão passando.

Essa transformação ocorre em um período de grandes avanços científicos e tecnológicos, embora saibamos que no setor elétrico a implantação de novas tecnologias depende do incentivo para a realização de pesquisas e a renovação de tecnologias.

As mudanças que estão ocorrendo no setor elétrico implicam o aumento progressivo da participação de fontes de geração: eólica e solar, participação de outras fontes alternativas de geração que exigem a presença de conversores tais como as células a combustível hidrogênio, microturbinas e dispositivos de armazenamento de energia.

É importante lembrar que a utilização tanto da energia solar quanto da energia eólica, assim como da própria energia hidráulica, depende diretamente dos fenômenos naturais: do movimento da Terra, da cobertura das nuvens, do regime dos ventos e das estações das chuvas. Todas essas formas de energias citadas têm utilização intermitente variando com as horas do dia, as estações do ano e a sua localização geográfica na superfície da Terra, mas todas elas podem ser otimizadas ou melhor transportadas e distribuídas com a aplicação dos dispositivos Facts.

Além disso, para se manter o fornecimento em níveis desejáveis de qualidade, haverá nos próximos anos a participação de sistemas de armazenamento de energia tanto para variações de carga de curta duração, quanto para o atendimento das necessidades do mercado de energia elétrica.

As tecnologias associadas aos dispositivos Facts já são bastante consolidadas em termos mundiais e demandam investimentos pesados em infraestrutura, indústria, logística etc. As características do SEB são complexas, pois envolve um País de dimensões continentais, regiões com grande densidade de carga em comparação com outras de baixa densidade e demanda elétricas, crescente participação de parques eólicos na matriz energética nacional e fomento à geração solar e participação de múltiplos agentes em consórcios para a operação de linhas de transmissão. Portanto, a adaptação da tecnologia Facts para as condições brasileiras é importante.

5.1.2. Objetivo geral

Os estudos de PD&I devem conduzir a absorção e a adaptação da tecnologia dos Facts pelo Brasil, servindo como subsídio para o projeto e o desenvolvimento de produtos nacionais confiáveis e economicamente competitivos. Considerando-se a ampla aplicabilidade da tecnologia Facts e a necessidade de atender à demanda do mercado, a nacionalização desta tecnologia se torna estratégica.

5.1.3. Objetivo específico

Para suportar o objetivo geral, é necessário que se obtenham por meio do PD&I os principais fatores motivadores para a sua aplicação, aqui separados em atividades de curto, médio e longo prazo:

Curto Prazo (2017-2020)

Em curto prazo, ou seja, de 2017 a 2020, o objetivo a ser alcançado com o desenvolvimento dos estudos de P&D é:

- Estado da arte de oportunidades e de aplicações de equipamentos Facts para o SEB.

Médio Prazo (2020-2030)

Em médio prazo, ou seja, de 2020 a 2030, será necessário o desenvolvimento de PD&I a fim de permitir uma evolução para atingir os seguintes objetivos:

- Uso intensivo da tecnologia VSC nos equipamentos Facts aplicados no SEB;
- Implantação de projetos pilotos de equipamentos Facts no SEB;
- Definição de pontos estratégicos e aplicação da tecnologia Facts para a melhoria de índices de qualidade e estabilidade do sistema.

Longo Prazo (2030-2050)

Em longo prazo, ou seja, entre 2030 e 2050, teremos como objetivos específicos:

- Sistemas de controle da tecnologia Facts completamente integrados com os demais sistemas de controle do SIN;
- Uso de equipamentos Facts com armazenamento de energia para a melhoria de índices de qualidade e estabilidade do sistema.

5.1.4. Fundamentação

A gestão técnica dos sistemas de energia elétrica em suas diversas vertentes torna-se cada vez mais complexa, o que conduz os agentes que atuam no setor a manterem permanentemente um processo de modernização e otimização do seu sistema, objetivando torná-lo cada vez mais inteligente e robusto.

Neste sentido, é premente o acompanhamento e a avaliação dos efeitos de forças transformadoras como o uso intensivo de fontes renováveis de energia, a participação cada vez mais importante da geração distribuída e o aprimoramento e redução dos custos dos dispositivos de armazenamento de energia.

Cria-se, assim, o campo ideal para o uso cada vez mais proeminente dos dispositivos Facts, que, pelo seu próprio conceito, apresenta potencialidades para contribuir na operação do sistema. Este conceito se refere a um conjunto de equipamentos elétricos de corrente alternada que operam acoplados a dispositivos de eletrônica de potência, de forma a tornar a operação mais flexível através do controle rápido e contínuo dos principais parâmetros do sistema.

Entretanto, para que se possa reforçar a implantação efetiva desses dispositivos, tem sido apontada a necessidade de realização de pesquisas e estudos mais detalhados relacionados com a integração desses equipamentos, considerando principalmente a interação das estratégias de controle empregadas com os diversos outros dispositivos na operação e no controle dos sistemas existentes. Pesquisas devem ser realizadas de forma a fornecer subsídios para garantir a atuação correta e coordenada desses dispositivos, principalmente quando da ocorrência de perturbações no sistema.

Boa parte das linhas de pesquisa apresentadas nas rotas tecnológicas já é pesquisada e desenvolvida no Brasil. A difusão tecnológica vem se dando em função da publicação de artigos científicos e da

produção de protótipos desenvolvidos nos laboratórios dos centros de pesquisa e universidades. Entretanto ainda não há um repasse para a indústria brasileira de eletrônica de potência, principalmente porque os dispositivos Facts são especificados e adquiridos nos leilões de linhas de transmissão e fornecidos por empresas mundialmente consolidadas no desenvolvimento dessa tecnologia.

A fundamentação que levou ao estabelecimento da visão de futuro dos resultados decorrentes das pesquisas foi baseada em publicações relacionados ao tema, tanto em âmbito mundial (*International Council on Large Eletric Systems* - Cigré, Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos - IEEE) quanto no nacional (Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE).

5.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática Facts 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, levando-se em conta o período até 2050 (ver Anexo).

A métrica otimização e redução na ocupação de área para instalação (m2) visa à compactação de elementos, da eletrônica de potência ao fomento de novas tecnologias isolantes, que deve ocorrer continuamente ao longo do tempo.

O desenvolvimento de *software* de controle que possibilite a comunicação e a operação integradas entre fabricantes diferentes deverá ser precedido por normas de regulação para a melhoria da performance e a aplicação em novos dispositivos, além da adequação do controle visando a tempos adequados sistêmicos com a evolução digital, a comunicação e a controlabilidade incorporadas.

A métrica otimização dos protocolos de comunicação dos equipamentos com centros de supervisão requer desenvolvimento e aprimoramento da gestão da comunicação e operação dos agentes e fabricantes com otimização operacional e econômica.

A métrica dispositivos Facts em sistemas de distribuição tem aplicações comuns ao Facts da transmissão, adicionando-se o controle do fluxo de potência. Atualmente em estágio de normalização na Europa, de grande uso na GD.

As métricas seguintes apresentam inter-relação com outras áreas de conhecimento.

A métrica aperfeiçoamento de matérias isolantes e aumento da capacidade de condução dos componentes eletrônicos fomenta reduzir o tamanho dos componentes, visando ao aumento da tensão nominal operativa das válvulas, responsáveis pelo controle dos equipamentos.

A métrica desenvolvimento de baterias e/ou células para armazenamento de energia (*flightweel*) visa aumentar a autonomia de armazenamento em 60 segundos, auxiliando a estabilidade sistêmica; em 1 hora, visando a saídas momentâneas de equipamentos por condições de manobras; em 6 horas, combinando estratégias de operação e manutenção preditiva; e em 24 horas, inferindo na operação otimizada no transcurso da vida útil dos equipamentos.

A métrica integração da transmissão CA com CC visa estudar a resolução dos problemas operacionais na CC quanto ao *multi-infeed* com a verificação sistêmica da operação conjunta.

A métrica atendimento à melhoria dos índices de qualidade de energia tem função implícita dos equipamentos Facts na transmissão, que deverão, juntamente ao processamento na distribuição da GD e ao planejamento no mercado livre, visar a qualidade da energia e a economicidade 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 na planilha de indicadores, conforme instruções nela constantes. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias, as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e SEB potencializam a melhoria ou a participação dessas questões no SEB, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

5.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas

Neste capítulo, são abordadas as métricas de desenvolvimento e as curvas de evolução da maturidade tecnológica das rotas consideradas no projeto. Tais pontos são apresentados, por temática, nos itens subsequentes.

5.3.1. Temática compensadores em paralelo

Roadmap tecnológico

Rota - SVC, Statcom

Desenvolvimento de conversores (VSC) em módulos multiníveis (CMM).

Análise qualitativa e econômica da aplicação das tecnologias SVC e Statcom. Estudo da confiabilidade das configurações dos equipamentos.

Avaliação dos critérios de planejamento e metodologia para a utilização do Facts no SIN.

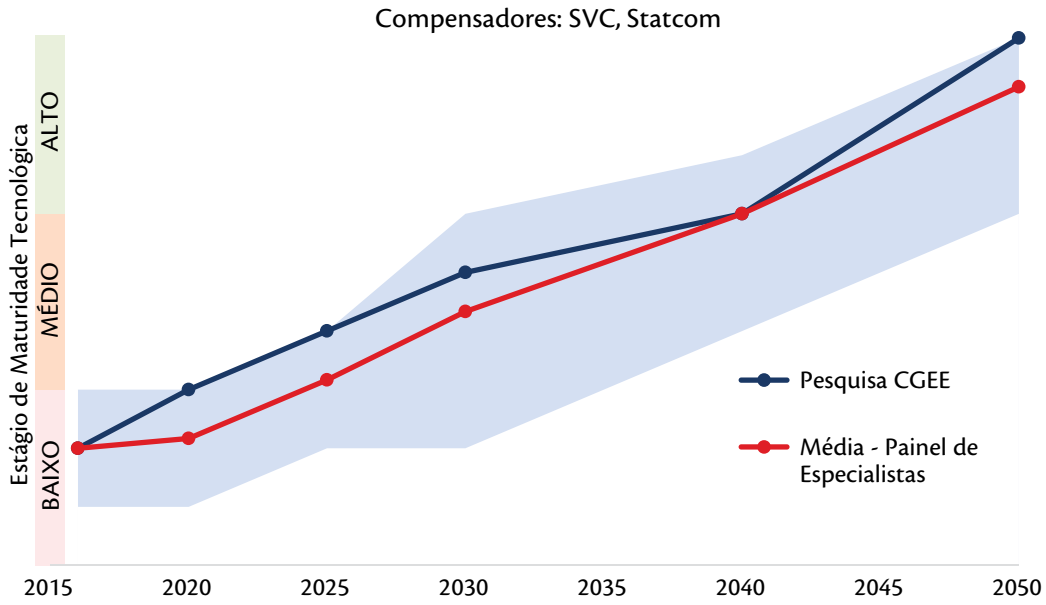

Gráfico 18 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensadores SVC, Statcom

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Reator Saturável e Reator Modular Chaveado

Desenvolver metodologia, estudos de confiabilidade e modelagem sobre tensões para compensação com reatores saturáveis e chaveamento modular de reativos e sua aplicação no SIN.

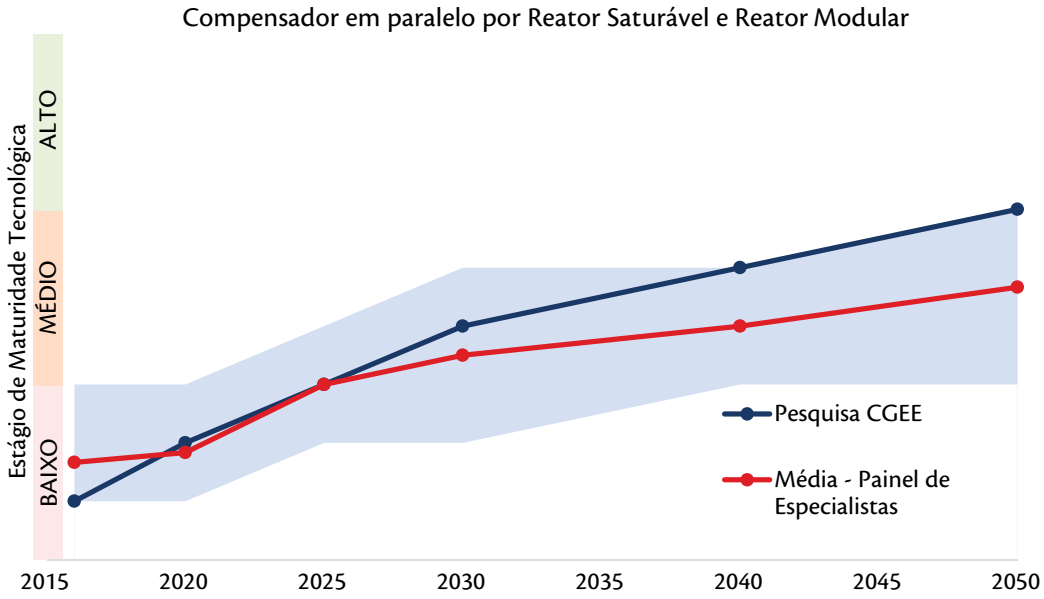

Gráfico 19 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensador em Paralelo por Reator Saturável e Reator Modular

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Compensadores com armazenamento de energia: Statcom (Baterias ou Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES ou Supercapacitores)

Estudo do controle e de componentes do VSC visando ao armazenamento de potência ativa via Statcom.

Avaliação de novas características de controle do Statcom para controle de tensão e frequência em sistemas eólicos e solares.

Estudos da redução das perdas nos componentes do Statcom e nas estratégias dos fluxos no sistema de transmissão.

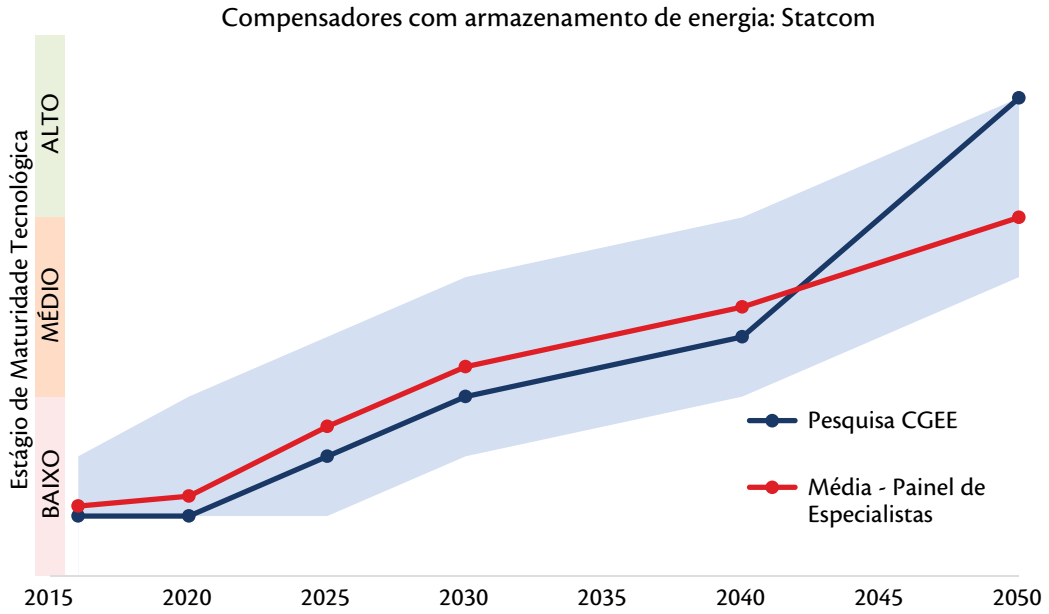

Gráfico 20 - Compensadores com armazenamento de energia: Statcom

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 Compensadores com Armazenamento de Energia: Statcom (Bateriais ou Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES ou Supercapacitores)/Reator Saturável e Reator Modular Chaveado e SVC, Statcom

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Compensadores em Paralelo	SVC, Statcom	Fatores portadores de futuro	Redução de custo do equipamento	Nível de aplicação no SEB (no ponto de vista qualitativo e quantitativo) Redução de custo do equipamento		Eletrônica de potência disponível como produto nacional	Eletrônica de potência aplicável no SEB	Autonomia nacional no controle e na operação dos compensadores estáticos
		Maturidade	BAIXO				ALTO	
	Reator Saturável e Reator Modular Chaveado	Fatores portadores de futuro	Aperfeiçoamento de tempo de resposta	Acoplamento híbrido do controle entre eletrônica e processos mecânicos		Melhoria operacional dos equipamentos mecânicos	Avaliação da melhoria para futuro uso	Avaliação da melhoria híbrida obtida, quanto à sua eficiência de utilização
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Compensadores com armazenamento de energia: Statcom (Bateriais ou Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES ou Supercapacitores)	Fatores portadores de futuro	Viabilização prática dos conhecimentos existentes		Estudos de mercado quanto à aplicação operacional e econômica		Avaliação da utilização eficaz dos equipamentos	
		Maturidade	BAIXO			ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Compensadores síncronos de velocidade variável com armazenamento de energia (associados ou não a usinas reversíveis)

Desenvolvimento de estratégias de armazenamento de energia em usinas reversíveis e compensadores de reativos que contribuam na operação otimizada em sistemas com geração intermitente.

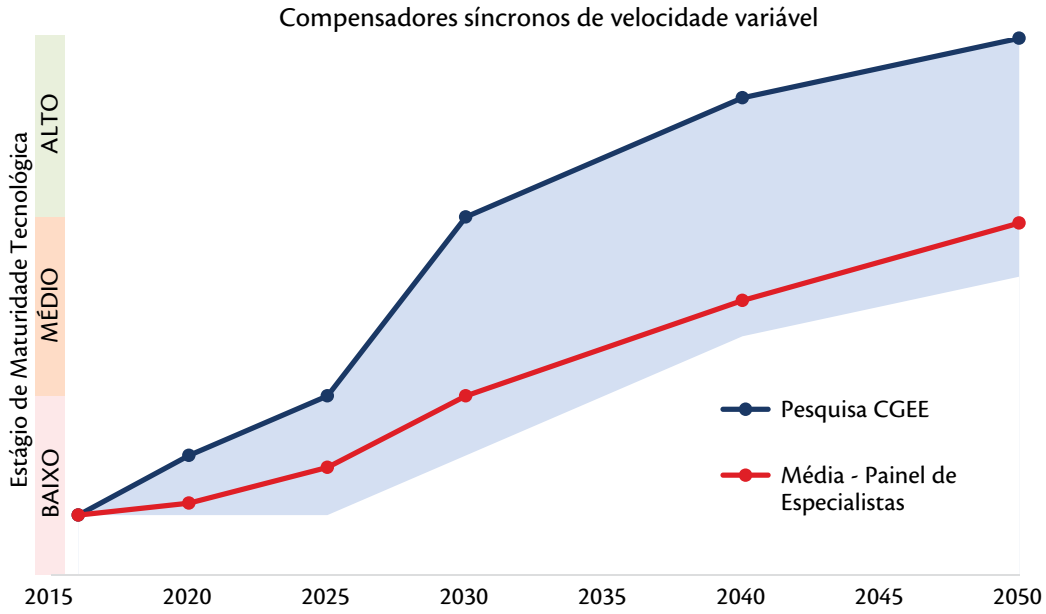

Gráfico 21 - Compensadores síncronos de velocidade variável

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Compensação de potência reativa (e ativa) usando conversores das fontes solar e eólicas

Pesquisa dos conversores das gerações intermitentes para funções de compensação reativa para controle de tensão e estabilidade.

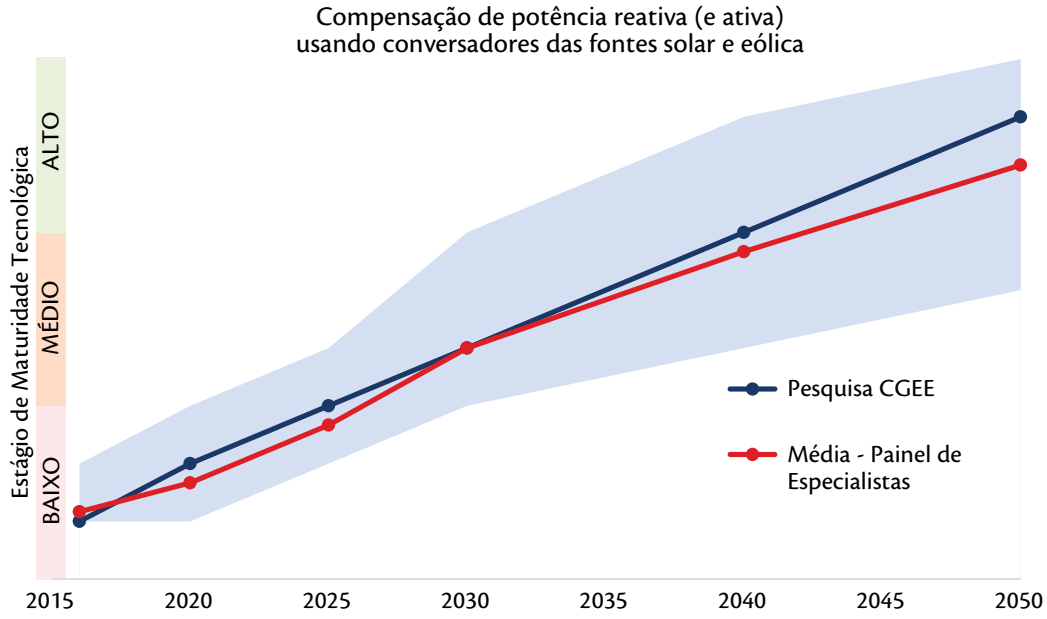

Gráfico 22 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensação de Potência Reativa (e Ativa) usando aos Conversores das Fontes Solar e Eólica

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Compensação de Potência Reativa (e Ativa) Usando Conversores das Fontes Solar e Eólicas e Compensadores Síncronos de Velocidade Variável com Armazenamento de Energia (associados ou não a usinas reversíveis)

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Compensadores em paralelo	Compensadores Síncronos de Velocidade Variável com Armazenamento de Energia (associados ou não a usinas reversíveis)	Fatores portadores de futuro	Avaliação da aplicabilidade do equipamento	Nível de aplicação no SEB (no ponto de vista qualitativo e quantitativo) / Redução do custo do equipamento		Eletrônica de potência aplicável e adequada ao produto		Autonomia nacional no controle e na operação dos compensadores
		Maturidade	BAIXO				ALTO	
	Compensação de Potência Reativa (e Ativa) Usando Conversores das Fontes Solar e Eólicas	Fatores portadores de futuro	Avaliação da aplicabilidade do equipamento	Nível de aplicação no SEB (no ponto de vista qualitativo e quantitativo) / Redução do custo do equipamento		Desenvolvimento dos meios de controle dos equipamentos	Adequação do desenvolvimento e operação ao SEB	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

5.3.2. Temática compensadores de potência reativa em série e paralelo-série

Roadmap tecnológico

Rota - *Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC)*

Estudos da análise da estabilidade dinâmica, pequenas perturbações e amortecimento de ressonância subsíncrona no sistema elétrico de potência.

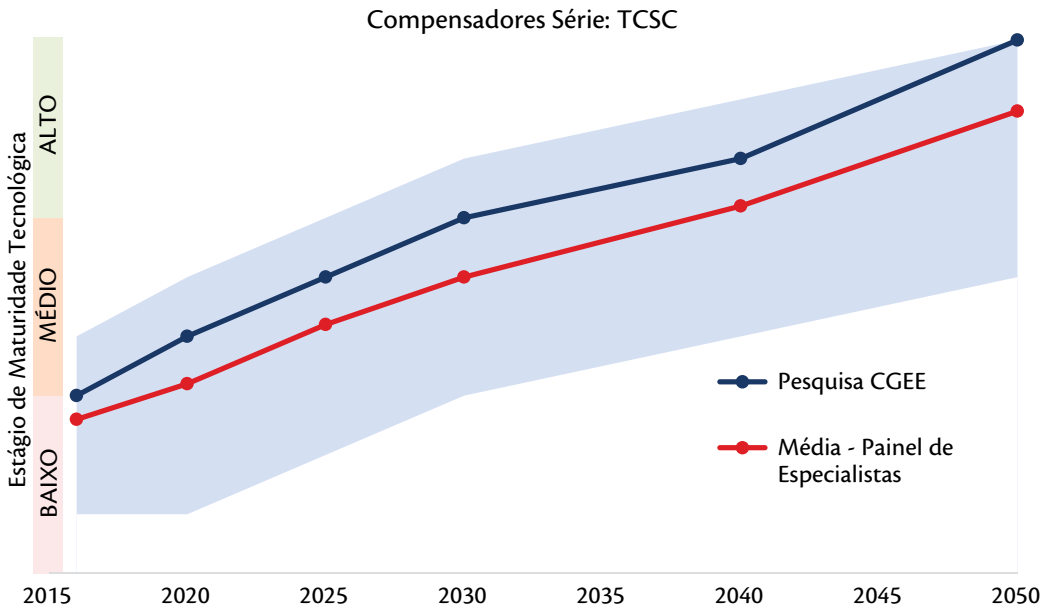

Gráfico 23 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensadores Série: TCSC

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Compensadores paralelo-série: UPFC e UPLC

Novas tecnologias de compensadores série (*Static Synchronous Series Controllers* - SSSC) e paralelo-série (*Unified Power Flow Controller* - UPFC e *Universal Power Line Conditioner* - UPLC).

Estudo do UPFC e UPLC para a utilização e o desenvolvimento de técnicas de controle para diferentes condições operacionais e do SSSC para a estabilidade e o amortecimento da ressonância subsíncrona.

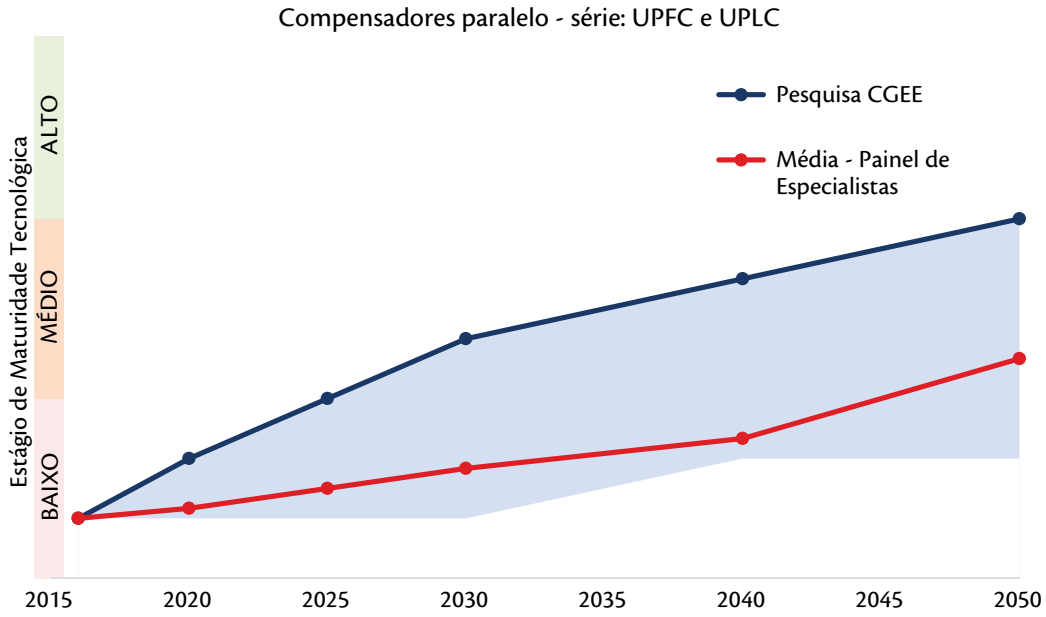

Gráfico 24 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensadores Paralelo-série: UPFC e UPLC

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 Controles de Equipamentos Facts e Interação com Demais Equipamentos/ Novas Tecnologias de Compensadores Série (SSSC) e Paralelo-Série (UPFC e UPLC) e TCSC

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Compensadores em paralelo-série	TCSC	Fatores portadores de futuro	Utilização operacional adequada, com restrições econômicas			Levantamento das dificuldades técnico-operacionais para a atualização do equipamento, ressonância subsíncronas, estabilidade dinâmica		
		Maturidade	BAIXO				ALTO	
	Novas tecnologias de compensadores série (SSSC) e paralelo-série (UPFC e UPLC)	Fatores portadores de futuro	Utilização operacional adequada, com restrições econômicas			Levantamento das dificuldades técnico-operacionais para a atualização do equipamento, ressonância subsíncronas, estabilidade dinâmica		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Controles de equipamentos Facts e interação com demais equipamentos	Fatores portadores de futuro	Protocolos conhecidos e modelos de comunicação por serem desenvolvidos				Influência dos órgãos reguladores, planejadores e operadores na adequada visão sistêmica do SEB	
			Adequação das tratativas relativas à comunicação entre agentes					
		Maturidade	BAIXO			ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

5.3.3. Temática controle e interação de equipamentos Facts

Roadmap tecnológico

Rota - Controles de equipamentos Facts e interação com demais equipamentos

Estudos de sistemas de potência para as condições de regime transitório, dinâmico e permanente, considerando-se a atuação dos equipamentos Facts para a melhoria sistêmica.

Verificação da interação da tecnologia Facts com os demais equipamentos, ressaltando o entendimento de comunicação e seus protocolos.

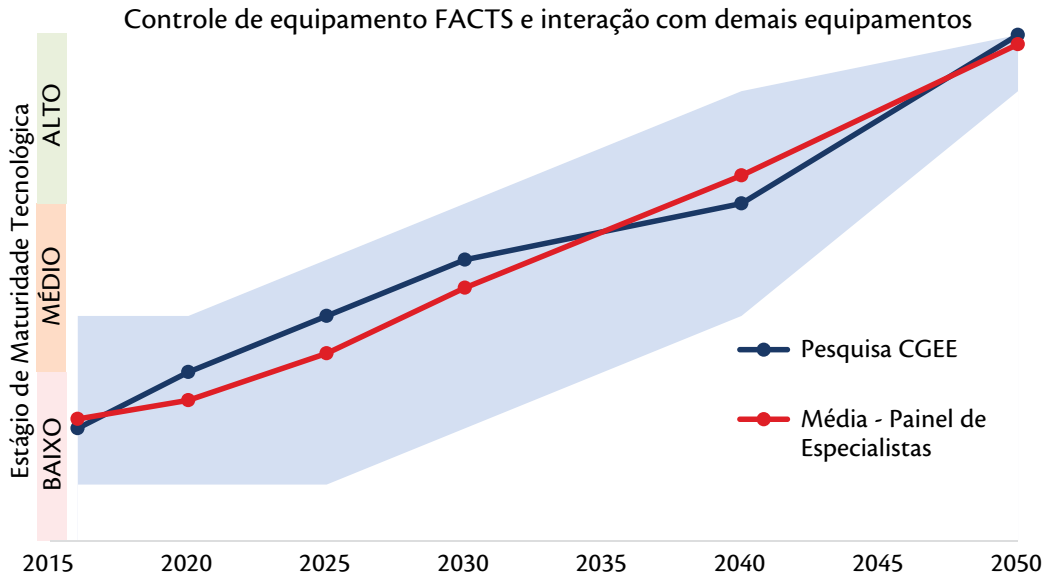

Gráfico 25 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Controle de Equipamento Facts e interação com demais equipamentos

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Controles de Equipamentos FACTS e Interação com os Demais Equipamentos

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Controle e Interação de Equipamentos Facts	Controles de Equipamentos Facts e Interação com Demais Equipamentos	Fatores portadores de futuro	Protocolos conhecidos e modelos de comunicação por serem desenvolvidos				Influência dos órgãos reguladores, planejadores e operadores na adequada visão sistêmica do SEB	
			Adequação das tratativas relativas à comunicação entre agentes					
		Maturidade	BAIXO			ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

5.3.4. Temática estudos e modelos para a aplicação de Facts

Roadmap tecnológico

Rota - Modelos para a aplicação de Facts

Desenvolvimento da modelagem Facts para a representação adequada nos programas digitais em uso no setor elétrico quanto aos estudos de transitórios, dinâmicos e em regime, considerando-se a atualização do Statcom multinível.

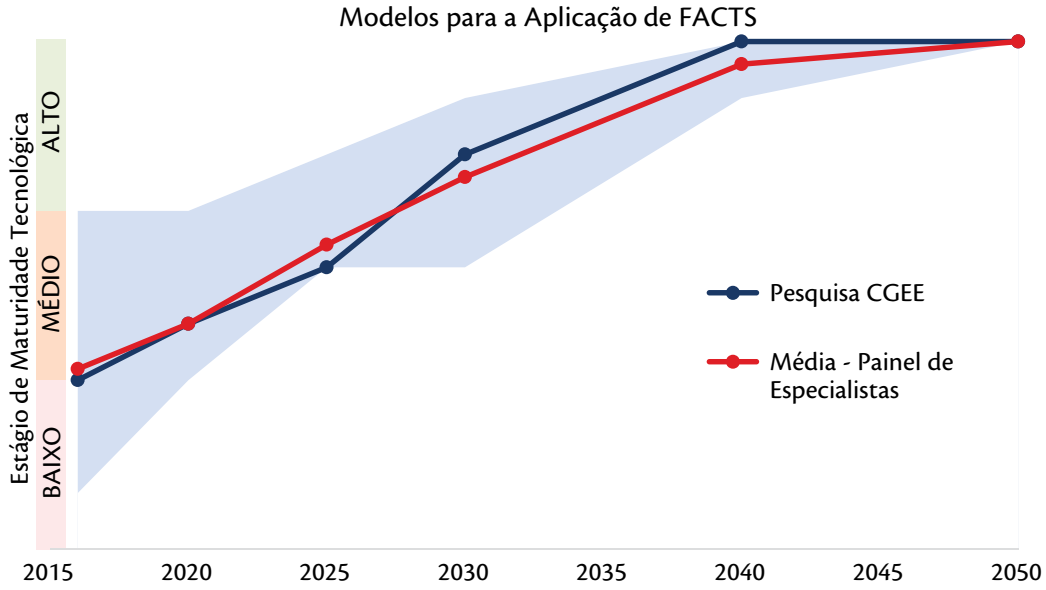

Gráfico 26 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Modelos para a Aplicação de Facts

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Estudos para a aplicação de Facts

Verificação das condições operacionais e de controle via Simulador Digital em Tempo Real (RTDS) anteriores à implantação do equipamento na rede.

Estudos dinâmicos comparativos do Statcom e SVC, qualitativos e fomento do custo-benefício entre as tecnologias.

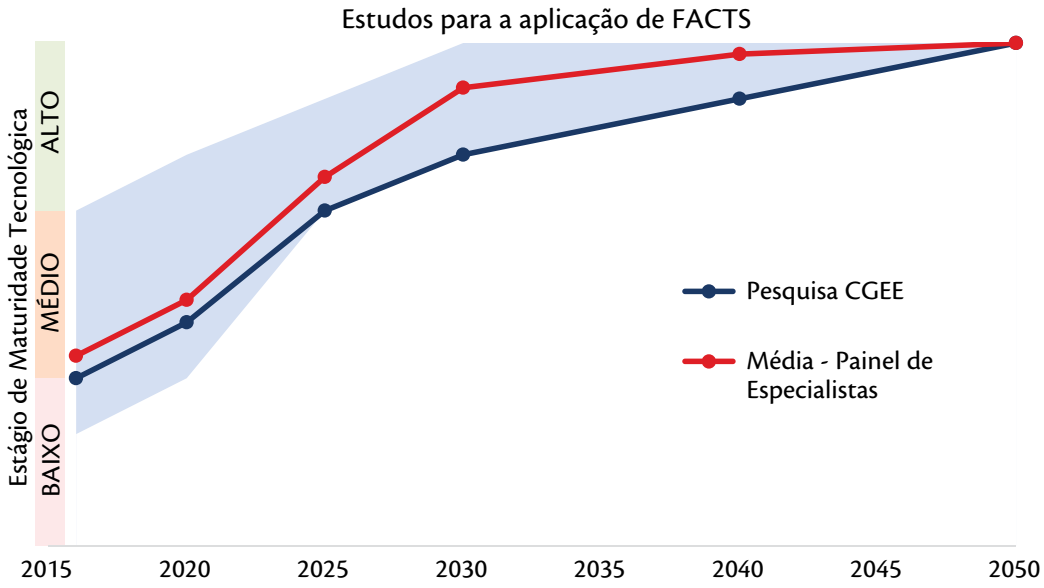

Gráfico 27 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudos para a Aplicação de Facts

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Estudos para a Aplicação de Facts e Modelos para a Aplicação de Facts

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Compensadores em Paralelo-série	Modelos para a Aplicação de Facts	Fatores portadores de futuro	Modelos existentes para a simulação de estudos gerais	Adequação para modelos de estudos transitórios dos equipamentos			Adequação para modelos de estudos de controle do sistema	
		Maturidade	BAIXO				ALTO	
	Estudos para a Aplicação de Facts	Fatores portadores de futuro	Definição de modelos para ferramentas do tipo RTDS		Verificação da comunicação entre equipamentos de diferentes fabricantes		Aplicação otimizada das tecnologias do tipo Statcom e MMCC	
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

5.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), 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 17.

Tabela 17 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Facts

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Modelos para a aplicação de Facts	Estudos e modelos para a aplicação de Facts
2	SVC, Statcom	Compensadores em paralelo
3	Controles de equipamentos Facts e interação com os demais equipamentos	Controle e interação de equipamentos Facts
4	Estudos para a aplicação de Facts	Estudos e modelos para a aplicação de Facts
5	Compensação de potência reativa (e ativa) usando conversores das fontes solar e eólicas	Compensadores em paralelo
6	Compensadores com armazenamento de energia: Statcom (Baterias ou Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES ou Supercapacitores)	Compensadores em paralelo
7	Compensadores síncronos de velocidade variável com armazenamento de energia (associados ou não a usinas reversíveis)	Compensadores em paralelo
8	TCSC	Compensadores de potência reativa em série e paralelo-série
9	Reator Saturável e Reator Modular Chaveado	Compensadores em paralelo
10	Novas tecnologias de compensadores série (SSSC) e paralelo-série (UPFC e UPLC)	Compensadores de potência reativa em série e paralelo-série

Fonte: Elaboração própria.

A compensação reativa do sistema elétrico brasileiro impõe grandes blocos de controle reativo face às extensões da linha de transmissão. Cabe controlar a operação do sistema de forma rápida e eficaz, surgindo daí a necessidade do sistema Facts.

É demandada a modelagem dos equipamentos Facts para as condições de operação em regime permanente, dinâmico e transitório. Constata-se que a tecnologia do SVC atendeu às demandas operacionais, advindo a tecnologia do Statcom para angariar novos tipos de controle no sistema. Atualmente, a introdução de fontes intermitentes reforça a necessidade de compensação reativa adequada ao tempo necessário de resposta ao sistema.

A tecnologia TCSC em operação no Brasil tem ajudado com sucesso no controle da estabilidade para pequenas perturbações.

Os compensadores com perspectiva de armazenamento de energia têm posições econômicas severas.

As novas tecnologias de compensadores série (SSSC) e paralelo-série (UPFC e UPLC) apresentam maturidade baixa a nível mundial e sem fomento técnico conhecido.

Capítulo 6

Capítulo 6

Macrotemática Supercondutores

A introdução de equipamentos e dispositivos supercondutores no sistema elétrico brasileiro poderá aumentar a confiabilidade na transmissão e distribuição, aumentar a ampacidade das redes elétricas, estabilizar fontes intermitentes de energia, como parques eólicos e plantas solares, assim como permitir a construção de geradores eólicos de potência superior a 10 MW. Devido ao baixo investimento em supercondutores no Brasil, o cenário brasileiro apresenta um atraso de mais de 10 anos em relação ao cenário mundial. Propõe-se uma estratégia para minorar esse atraso, que consiste em tropicalizar os equipamentos com elevado nível de prontidão tecnológica existentes no mundo e, em paralelo, iniciar a nacionalização desses equipamentos, assim como desenvolver a produção dos materiais supercondutores e sistemas ancilares com o objetivo de dominar todo o ciclo de produção dos dispositivos supercondutores.

6.1. Visão de futuro

6.1.1. Cenário setorial

O cenário setorial mostra uma forte tendência de crescimento do consumo de energia elétrica nos próximos 30 anos, o que levará ao aumento na demanda por geração e transmissão de energia elétrica. Este aumento, aliado ao alto custo de áreas territoriais urbanas necessárias para a construção de subestações e para a faixa de servidão de redes aéreas, gera uma demanda por tecnologias que compactem as subestações e aumentem a densidade de potência transmitida. Cabos, transformadores e limitadores de corrente supercondutores permitem essa compactação e o aumento na densidade de potência transmitida.

O esgotamento da capacidade de geração hidráulica levará a um aumento da demanda por geração eólica com custos competitivos. A construção de geradores eólicos de grande porte diminuiria os

custos da geração, porém a construção de aerogeradores com potência maior ou igual a 10 MW só é viável com o uso de geradores supercondutores, devido à elevada densidade de potência destes, tornando-os bem mais compactos e leves que os convencionais.

As dificuldades socioambientais para a construção de novos reservatórios hídricos e o aumento do parque de geração eólica e solar levam à necessidade de novas tecnologias de armazenamento de energia elétrica para o nivelamento da oferta de energia, devido ao uso de fontes intermitentes de energia. Os armazenadores cinéticos de energia (*Flywheels*) de alta velocidade com mancais magnéticos supercondutores e os SMES oferecem um armazenamento eficiente que pode ser utilizado no nivelamento da oferta de energia de parques de geração eólica e solar e na estabilização de redes de transmissão e distribuição, no que tange ao controle de frequência, estabilidade de tensão, suprimento de energia ativa e reativa etc.

Adicionalmente, qualquer projeto de PD&I deve ter como objetivo a promoção e os estímulos para a formação de consórcios e parcerias envolvendo concessionárias de energia elétrica, fabricantes, universidades e centros de pesquisa (nacionais e internacionais).

A macrotemática Supercondutores Aplicados ao Sistema Elétrico Brasileiro foi subdividida em três temáticas. A temática principal: Aplicações, que engloba todas as aplicações consideradas relevantes devido ao seu impacto no sistema elétrico brasileiro, assim como o seu nível mundial de prontidão tecnológica, é circundada pelas temáticas: Materiais e Sistemas Ancilares e Isolantes, consideradas fundamentais para um domínio completo das aplicações relevantes a longo prazo.

6.1.2. Objetivo geral

Os estudos de PD&I devem conduzir a introdução de equipamentos e dispositivos supercondutores no SEB, aumentando a confiabilidade na transmissão e distribuição, com o uso de limitadores de corrente supercondutores e o aumento da ampacidade das redes elétricas utilizando cabos e barramentos supercondutores. Outro objetivo importante para este tema é o desenvolvimento de geradores eólicos supercondutores com potência superior à 10 MW e a melhoria da qualidade de energia dos sistemas elétricos com armazenadores de energia supercondutores (SMES e *Flywheels*). Além disso, é de fundamental interesse o uso de transformadores e de cabos supercondutores, permitindo a diminuição de espaço e peso, a inclusão da função de limitação de corrente e o aumento do tempo de sobrecarga dos transformadores.

6.1.3. Objetivo específico

Para suportar o objetivo geral, é necessário que se obtenha por meio do PD&I os principais fatores motivadores para a sua aplicação, aqui separados em atividades de curto, médio e longo prazo:

Curto prazo (2017-2020):

- Estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental para a aplicação de cabos e limitadores de corrente supercondutores;
- Testes de cabos e limitadores de corrente supercondutores importados;
- Pesquisa aplicada para a construção de limitador de corrente nacional;
- Pesquisa aplicada para o desenvolvimento de sistemas criogênicos para uso com os dispositivos supercondutores.

Médio prazo (2020-2030):

- Projetos de planta piloto no Brasil em nível de distribuição e transmissão (até 220 kV);
- Inserção de cabos e limitadores de corrente supercondutores importados no sistema elétrico;
- Fabricação no Brasil de cabos e limitadores de corrente;
- Protótipos de aerogeradores, transformadores e armazenadores de energia (SMES e *Flywheels*) supercondutores.

Longo prazo (2030-2050):

- Fabricação de fitas supercondutoras 2G (ou outros materiais que possam vir a surgir);
- Disponibilidade de cabos e limitadores de corrente nacionais;
- Inserção de outras tecnologias supercondutoras no sistema elétrico brasileiro, tais como: aerogeradores, transformadores e SMES;
- Domínio do processo de produção das matérias-primas para a fabricação das fitas 2G, incluindo os elementos de terras raras;
- Normas e padrões nacionais estabelecidos para os equipamentos supercondutores.

6.1.4. Fundamentação

Dado que o cenário tecnológico brasileiro atual de aplicações de supercondutores para o setor elétrico está defasado em cerca de 10 anos em relação ao cenário internacional, foi tomada como base a evolução da tecnologia no mundo para nortear o presente estudo.

Para o cenário internacional, a fundamentação teórica foi baseada em *Roadmaps* da Agência Internacional de Energia (IEA) (2013, 2015), brochuras técnicas do Cigré(2010, 2015), literatura internacional e participações dos autores em eventos e fóruns internacionais do setor elétrico e de supercondutividade aplicada.

No caso do cenário nacional, existem poucos grupos de pesquisa que trabalham com aplicações de supercondutores no setor elétrico. Esses grupos se encontram principalmente nas seguintes instituições: Cepel/Centrais Elétricas Brasileiras S. A. (Eletrobras), Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e Universidade de São Paulo (USP-Lorena). A visão de futuro do cenário nacional foi construída com base na produção científica e acadêmica desses grupos. Existem ainda outros grupos no Brasil que trabalham na área de supercondutividade, todavia seu enfoque está em pesquisas voltadas para fundamentos teóricos e desenvolvimento de materiais supercondutores.

6.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Os itens a seguir apresentam o cenário geral desta macrotemática, considerando-se os aspectos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I e indústria e mercado. O esquema resumido deste capítulo encontra-se no Anexo - Planilha de Indicadores.

No cenário geral do setor elétrico, os equipamentos e dispositivos que utilizam materiais supercondutores apresentam grande potencial, principalmente quando se pensa nas melhorias futuras dos sistemas de energia elétrica, podendo ser aplicados na geração, transmissão, distribuição e armazenamento da energia elétrica. As métricas que foram estabelecidas para que as tecnologias supercondutoras no setor elétrico possam atingir maior grau de maturidade no mercado nacional são:

- Aumentar a corrente crítica: é uma forma de viabilizar os equipamentos supercondutores técnica e economicamente, de modo a atingir maior grau de maturidade. Nos últimos anos, tem se observado um aumento significativo da corrente crítica (I_c) nos materiais supercondutores comerciais de alta temperatura crítica, apresentando um aumento quase exponencial de I_c e do comprimento total de material construído continuamente ao longo das duas últimas décadas até 2013 (SHIOHARA *et. al.*, 2013).

- O mesmo comportamento de 2013 até 2017 deverá se repetir na próxima década, pois ainda há bastante campo para a evolução da tecnologia pelos fabricantes, no que se refere a três parâmetros que influenciam na qualidade do material: aumento da espessura da camada supercondutora (que hoje é da ordem de 1 a 2 µm), aumento da largura da fita supercondutora (que hoje alcança 12 mm) e aumento do comprimento contínuo de fio fabricado (que hoje atinge limite da ordem de 1000 m). Os fabricantes vêm evoluindo nesses três parâmetros e ainda existe muito espaço para avanço em todos eles. Obviamente não é possível aumentar I_c indefinidamente, pois há um limite teórico máximo para a densidade de corrente crítica, que é da ordem de 3×10^{12} A/m² a 4.2 K para o *Yttrium Barium Copper Oxid* (YBCO), segundo Larbalestier (2001). Dessa forma, espera-se que a corrente crítica alcance grande maturidade na próxima década e que depois tenha um crescimento reduzido da taxa de evolução de Ic, por volta de 2030, e que se obtenha uma saturação nessa evolução entre 2040 e 2050. Após 2030, deve haver uma tendência de redução de custo de fabricação, estimulada pela concorrência e pelos fabricantes já terem recebido o retorno pelo desenvolvimento da tecnologia. Vale observar que a redução do custo não depende só do aumento do desempenho do material, como também do método de fabricação utilizado e do aumento da escala de produção. Há diversos métodos de fabricação das fitas 2G com variados graus de complexidade.

- Aumento da densidade de potência: o aumento da densidade de potência se refere à aplicação dos materiais supercondutores com melhores propriedades elétricas quando utilizados nos equipamentos elétricos. Isso se deve ao fato de que os supercondutores podem transportar uma corrente até cem vezes maior que um condutor convencional de mesmas dimensões, diferença esta que vem crescendo nos últimos anos com a melhoria da qualidade de fabricação. Com o aumento da qualidade, está sendo possível também melhorar outro parâmetro crítico do supercondutor, a dependência da I_c com o campo magnético, já que a I_c não somente sofre redução com a intensidade do campo magnético que incide no supercondutor, como esta redução também tem uma dependência complexa com a direção em que o campo incide no supercondutor. Melhorando as propriedades da I_c será possível reduzir o espaçamento entre os fios supercondutores que estão arranjados em paralelo, aumentando a capacidade de compactação de bobinas e cabos, e consecutivamente sua ampacidade e densidade de potência (pois será necessário utilizar um volume menor para uma mesma potência do equipamento). As pesquisas realizadas atualmente já vão nesse sentido e, dado o nível atual

de maturidade de cabos e limitadores supercondutores (que é de médio indo para alto), espera-se que em nível internacional essas tecnologias estejam maduras por volta de 2030. Outras tecnologias podem se beneficiar dessa evolução, principalmente as que utilizam aço como núcleo de um circuito magnético, como as máquinas elétricas e os transformadores; o uso de bobinas supercondutoras pode eliminar o núcleo ferromagnético, o que leva a uma grande redução de peso e volume do dispositivo. Todavia, essas tecnologias ainda necessitam de maior maturação e apenas por volta de 2040 seria possível obter um portfólio com diversas tecnologias supercondutoras disponíveis para comercialização.

- Aumentar a eficiência: refere-se à propriedade intrínseca dos materiais supercondutores, que apresentam uma resistência elétrica em corrente contínua nula e uma resistência elétrica muito inferior à dos condutores convencionais em corrente alternada. Deve-se lembrar que o supercondutor precisa de refrigeração criogênica para que essas propriedades sejam obtidas e que o gasto energético com a refrigeração do material deve fazer parte da conta da eficiência. Nos últimos anos, diversos fabricantes de refrigeradores criogênicos (*cryocoolers*) se estabeleceram no mercado, o que possibilitou uma redução no custo de aquisição dos *cryocoolers*. Uma preocupação desses fabricantes tem sido melhorar a eficiência de seus equipamentos. No cenário nacional, não existem ainda fabricantes que sejam capazes de produzir os *cryocoolers*, todavia, há espaço para a contribuição nacional no sistema de refrigeração como um todo, considerando a fabricação dos criostatos (reservatórios criogênicos) para os equipamentos elétricos.
- Como os cabos e os limitadores de corrente devem atingir a sua maturidade máxima na década de 2030 (cenário internacional), então se espera que esses equipamentos também sejam otimizados em termos de eficiência energética, não havendo muito mais campo para evolução na década de 2050. A evolução da eficiência energética das demais rotas envolvendo os materiais supercondutores deve ocorrer de forma similar à das tecnologias mais maduras (cabos e limitadores), mas com uma defasagem de 10 a 15 anos no cenário internacional. Como o Brasil está defasado quase uma década em relação ao cenário mundial, espera-se que o caminho natural da evolução tecnológica brasileira seja por meio da tropicalização das tecnologias de cabos e limitadores. Esta é a forma mais viável de reduzir a nossa defasagem nessas tecnologias. Nas demais tecnologias de equipamentos supercondutores, há espaço para a nacionalização, entretanto serão necessárias políticas de incentivo governamentais e de P&Ds para que a defasagem tecnológica não se acentue.
- Aumentar a tensão nominal: um dos principais objetivos do projeto de equipamentos elétricos com materiais supercondutores é aumentar a tensão nominal de operação. No cenário internacional, os cabos supercondutores apresentam atualmente diversos projetos de cabos instalados desde o nível de distribuição até 138 kV, existindo ainda projetos para níveis mais altos de tensão e cabos disponíveis com até 275 kV (MUKOYAMA 2011; YAGI 2015). Em relação aos limitadores de corrente de curto-circuito, este cenário se repete, com diversos

equipamentos desenvolvidos para nível de tensão de distribuição ou subtransmissão, com dezenas de kV e um projeto chinês da InnoPower, que desenvolveu um limitador de corrente de núcleo saturado para tensão nominal de 220 kV, e o mesmo grupo tem um projeto de limitador de 500 kV com a mesma tecnologia (CIGRÉ, 2015). Há também projetos em curso de equipamentos de 138-220 kV. Todos esses projetos são de protótipos pilotos instalados na rede elétrica em diversos países. Espera-se, então, que surjam no cenário internacional mais projetos com caráter de cabeça de série, em uma fase comercial em menor escala (ainda customizada), para níveis de tensão de distribuição no início da década de 2020, que evoluiria para nível de tensão de subtransmissão em 2025, para finalmente atingir níveis de tensão de 220-500 kV em 2030. Os níveis de tensão de ultra-alta tensão seriam atingíveis apenas durante a década de 2050. De forma similar, as demais tecnologias, menos maduras, demandariam mais tempo para evoluir no nível de tensão dos equipamentos disponíveis. O Brasil novamente estaria defasado tecnologicamente em uma década nesse quesito, podendo reduzir esta defasagem por meio de projetos de tropicalização e transferência de tecnologia, via instalação de plantas piloto no País.

- Redução de custos: trata da redução de custos dos materiais supercondutores, que é um dos fatores determinantes para a consolidação dessa tecnologia. De maneira geral, um dos fatores mais importantes para a viabilidade econômica de uma tecnologia inovadora é que ela apresente custos competitivos com as demais tecnologias já estabelecidas. É fundamental que haja uma redução de custo a médio e longo prazo das fitas e fios supercondutores para que os equipamentos com materiais supercondutores sejam economicamente viáveis. Dessa forma, a análise dessa métrica no que tange aos materiais deve ser feita observando-se a melhoria do custo-benefício das fitas supercondutoras 2G e dos fios de MgB_2, pois é exatamente o que vem sendo feito no mercado internacional. Isso significa que o custo/desempenho vem sendo praticamente o mesmo nos últimos anos, com média entre os fabricantes da ordem de100-200 US$/kA.m de fitas com 12 mm de largura, que está sendo acompanhada de uma melhoria significativa da qualidade das fitas, com evolução contínua de I_c. O que se espera é que à medida que a evolução da corrente crítica alcance um nível de saturação, acompanhada pela recuperação no investimento feito pelos fabricantes, ocorra uma redução no custo das fitas supercondutoras para os consumidores finais, tal como já aconteceu com os fios supercondutores de baixa temperatura à base de Nióbio-Titânio (Nb-Ti), que já alcançam cerca de 5 US$/kA.m. Estes fios, contudo, são mais apropriados para magnetos de alto campo, não sendo adequados para aplicações no setor elétrico de potência, pois requerem o uso de hélio líquido (4, 2 K), enquanto os de alta temperatura podem ser utilizados com nitrogênio líquido ou hélio gasoso, o que torna a refrigeração bem mais viável para diversas aplicações. Fenômeno similar aconteceu com as fibras óticas para sistemas de comunicação, que possuíam um custo muito elevado nos primeiros anos de desenvolvimento e atualmente são comercializadas amplamente a custos acessíveis.

Espera-se, então, que até 2025 não haja uma grande redução no preço de mercado dos materiais supercondutores, mas que haverá aumento de qualidade, conforme mencionado na métrica de aumento de corrente crítica, melhorando, assim, a relação custo/desempenho. Entre 2025 e 2030, pode haver uma redução considerável dos preços dos materiais supercondutores. Já a partir da década de 2030, fitas 2G e fios de MgB_2 devem tornar-se competitivos devido à maturidade da tecnologia, ao aumento da demanda e à concorrência entre os diversos fabricantes já estabelecidos. Já em 2040-2050, espera-se que os supercondutores tenham preços competitivos com o cobre em termos de custo-benefício para temperatura de 77 K. Isso permitirá uma viabilização econômica de muitos outros equipamentos com materiais supercondutores.

Tão importante quanto o custo dos materiais supercondutores é o custo dos *cryocoolers* para refrigeração em ciclo fechado, de modo a viabilizar o desenvolvimento tecnológico dos equipamentos elétricos para sistemas de energia. Esses equipamentos ainda estão comercialmente restritos a laboratórios e equipamentos militares. Todavia, à medida que houver um aumento de demanda por sistemas de refrigeração criogênicos, deverá ser mantida essa tendência de redução de custos dos *cryocoolers* de maneira contínua até o final da década de 2040. Espera-se que o custo dos sistemas de refrigeração seja relativamente pequeno frente ao custo dos equipamentos supercondutores na década de 2050.

- Nacionalização da tecnologia: trata da nacionalização da tecnologia de equipamentos e materiais supercondutores. Como já destacado, há uma defasagem tecnológica do cenário nacional em relação ao internacional, que é em média de 10 anos. Não faz sentido tentar desenvolver a tecnologia nacional (e reduzir essa defasagem) partindo da estaca zero e seguindo novamente todos os passos da pesquisa. Uma solução seria iniciar as pesquisas pela tropicalização de diversas tecnologias que estão mais maduras no exterior. Para tanto, deveria ser tropicalizado aquilo que não existe no Brasil, buscando utilizar partes nacionais que eventualmente existam em nosso mercado. Isso permitirá desenvolver em médio prazo parte da tecnologia, que passaria a ser nacionalizada. Em longo prazo, poderá ser feita uma engenharia reversa que permitirá nacionalizar grande parte de toda a tecnologia dos equipamentos elétricos com materiais supercondutores, importando apenas as partes que ainda não puderem ser feitas no Brasil.

Em relação à geração de energia elétrica, o destaque é para as máquinas supercondutoras, que permitem a fabricação de geradores com aproximadamente a metade do peso e do volume que as máquinas convencionais, considerando-se o mesmo nível de potência. Destaca-se que uma das aplicações mais promissoras das máquinas supercondutoras é na fabricação de aerogeradores com potência igual ou superior a 10 MW. Esses aerogeradores de alta potência podem ser aplicados tanto a sistemas *onshore* quanto *offshore*. Como vantagem, os aerogeradores supercondutores permitem que sejam utilizadas na construção torres com estruturas mais delgadas, que representam um ganho

econômico. Esta tecnologia também apresenta ganhos na eficiência energética e possibilidade da redução da quantidade de aerogeradores instalados. Estas características abrem campo de estudo para a otimização da geração por energia eólica.

Tanto para a transmissão, quanto para a distribuição de energia elétrica, diversos equipamentos podem utilizar materiais supercondutores para melhorar o desempenho do sistema, ou ainda agregar novas funções como: limitadores de corrente de curto-circuito, cabos supercondutores, armazenadores magnéticos de energia supercondutores, armazenadores cinéticos de energia com mancais supercondutores e transformadores supercondutores.

Ainda considerando-se os aspectos de evolução tecnológica, podem ser levantadas outras métricas que apresentam correlação com outras áreas do conhecimento que extrapolam os limites dessa macrotemática.

Necessidade de estender a vida útil de equipamentos superados em subestações

A inserção de novas usinas geradoras não previstas na construção do sistema atual, o aumento de interconexões do sistema elétrico e as usinas próximas a centros urbanos contribuem para o aumento dos níveis de corrente de curto-circuito (DE SOUSA, 2012; NOE 2007). No Brasil, a inserção de novas usinas geradoras tem sido considerada como a principal causa para o aumento dos níveis de curto-circuito. Por conseguinte, o crescimento da geração distribuída é um fator a ser considerado, devido à elevação do nível de curto-circuito.

Desse modo, temos a superação da capacidade dos equipamentos (transformadores, barramentos, disjuntores etc.), ou seja, equipamentos que não foram projetados para suportar os novos e elevados níveis de corrente de curto. Os principais meios para resolver ou contornar este problema consistem na troca de todos os equipamentos superados, na reconfiguração do sistema ou no emprego de dispositivos que reduzam a amplitude da corrente para níveis aceitáveis pelos equipamentos na ocorrência de um curto-circuito (limitador de corrente). A troca dos equipamentos superados pode ser inviável, tanto economicamente quanto operacionalmente, devido à necessidade de longas paradas nas subestações. Modificações na rede, tais como o seccionamento de barramentos, a radialização de circuitos e a divisão em circuitos de menor capacidade, representam apenas soluções provisórias, por reduzirem a flexibilidade e a confiabilidade do sistema (DE SOUSA, 2012).

Limitadores de corrente são dispositivos capazes de atenuar, ou até mesmo de bloquear, picos de sobrecorrente com rapidez suficiente para que os disjuntores possam então atuar com segurança. Deste modo, a aplicação desses dispositivos apresenta-se como solução de longo prazo evitando a necessidade de recapacitação de uma subestação, mantendo e aumentando a estabilidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, além de prolongar a vida útil dos equipamentos superados.

Desse modo, a crescente superação de equipamentos devido ao aumento das correntes de curto-circuito pode aumentar a demanda por dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores. Ao evitar a necessidade de recapacitação de subestações, a utilização desses dispositivos permitirá o aumento da sua vida útil.

Demanda pelo aumento da capacidade de transmissão e distribuição em áreas densamente povoadas

O crescimento da demanda por energia elétrica em áreas densamente povoadas está associado à combinação de dois fatores: aumento da população urbana e aumento do consumo de energia elétrica *per capita*. Deste modo, requer-se uma maior capacidade de transmissão e de distribuição em áreas densamente povoadas. Por outro lado, em grandes centros urbanos há restrições de faixa de servidão disponíveis para linhas de transmissão e distribuição, seja pela disponibilidade de espaço, seja por questões ambientais.

Cabos supercondutores têm alta ampacidade, sendo vantajosos para a aplicação em linhas subterrâneas de áreas urbanas em que haja limitações para a expansão da rede ou para o aumento da carga em trechos congestionados. Além de ocuparem menos espaço que cabos convencionais, praticamente não emitem calor e campos magnéticos, possibilitando um melhor aproveitamento de dutos subterrâneos (HASSENZAHL, 2004). Com isso, pode-se evitar a ampliação ou a construção de novas infraestruturas para a passagem dos cabos, pois os dutos subterrâneos já existentes podem continuar a ser utilizados e ainda serão capazes de transmitir maiores potências. Esta é uma excelente possibilidade, principalmente para as áreas densamente povoadas, onde o custo de construção de novos túneis e dutos é elevado, sem contar as questões relacionadas às restrições de faixas de servidão. Cabos supercondutores também permitem a redução da tensão para uma dada potência, minimizando o número de subestações e as perdas totais na rede (STEMMLE, 2013).

Demanda por aerogeradores com 10 MW ou mais

A energia eólica é a fonte que mais cresce na matriz energética nacional. O Plano Decenal de Energia (PDE) (EPE, 2014) mostra que o Brasil possuía, em 2013, uma capacidade instalada de 2.191 MW, e indica que esta capacidade pode chegar a 22.439 MW, em 2023 (CGEE, 2015).

A evolução do crescimento das dimensões e potência dos aerogeradores *onshore* instalados no Brasil sugere que por volta de 2020 será possível a instalação de aerogeradores de 5 MW no Brasil (CGEE, 2015). Já o mercado *offshore* ainda não foi explorado no Brasil, devido ao grande potencial eólico disponível em terra, estimado em mais de 350 GW (GWEC, 2012). Contudo, uma exceção poderá ocorrer caso algum projeto *offshore* seja desenvolvido na costa brasileira.

Atualmente, uma das aplicações mais promissoras das máquinas rotativas supercondutoras é na fabricação de aerogeradores com potência igual ou superior a 10 MW e peso e dimensões próximos aos de aerogeradores convencionais de 5 MW. Desse modo, tais aerogeradores de alta potência podem ser aplicados tanto a sistemas *onshore* quanto *offshore*. Prevê-se que aerogeradores eólicos supercondutores alcançarão a comercialização em 2030 (IEA 2015).

Portanto, considerando-se as tendências acima descritas para a evolução da energia eólica no Brasil, podemos antever que a aplicação de aerogeradores supercondutores no País ocorra em 2030-2040.

Demanda pela estabilização do fornecimento de energia com fontes intermitentes

A importância das tecnologias de armazenamento energético vem crescendo continuamente nos últimos anos, principalmente devido à intensificação da participação das fontes alternativas intermitentes de energia e do crescimento dos empreendimentos de geração distribuída e *Smart Grid* em sistemas elétricos. Vale observar que a geração distribuída e os *Smart Grids* também tendem a envolver fontes intermitentes. Em todo o mundo, as atividades de pesquisa e desenvolvimento estão focadas na busca de tecnologias eficientes de armazenamento energético que apresentem ainda perspectivas de redução de custos.

Sistemas de armazenamento de energia magnética em supercondutores (SMES) são um meio de armazenamento direto de energia elétrica, podendo superar 90% de eficiência (EPRI, 2005). As características dos SMES tornam seu uso particularmente interessante para sistemas de armazenamento com altas potências (MWs) e descarga rápida (ms) visando ao aumento da qualidade da energia

e da estabilidade da rede (CIGRÉ, 2010; DANIEL; POLASEK, 2014). Aplicações potenciais incluem nivelamento de carga, estabilidade dinâmica e transitória, estabilidade de tensão e de frequência, *backup* para cargas críticas e fonte de alimentação ininterrupta (UPS) (ALI, 2010). SMES também são promissores para microrredes e *Smart Grids* (JIN, 2012; MOLINA, 2012).

Vale destacar as possibilidades de aplicação relacionadas à geração por fontes de energia renováveis intermitentes (solar e eólica). Devido às variações de velocidade do vento, a potência de saída do gerador eólico flutua de forma aleatória e, consequentemente, pode causar flutuações na frequência do sistema (ALI, 2008; SHEIKH, 2009). O SMES pode ser associado à geração fotovoltaica (FV) para melhorar a sua utilização, uma vez que a torna menos dependente das condições climáticas, pois a energia pode ser armazenada no SMES e devolvida ao sistema em um momento conveniente. Um sistema FV com SMES é mais eficaz devido ao nivelamento de carga diurno.

Supercondutores também podem ser aplicados em volantes de inércia, também conhecidos como mancais rotativos ou *Flywheels*, os quais armazenam energia cinética. O dispositivo armazena energia cinética quando o volante é acelerado e devolve energia quando desacelerado (STEPHAN, 2013). *Flywheels* podem ou não ser baseados em supercondutores.

Volantes de inércia têm elevado ciclo de vida, podendo superar 100.000 ciclos completos de carga e descarga ou mais de 20 anos de vida útil, segundo estimativas (DOE/EPRI, 2013). Tipicamente, tais sistemas podem armazenar de 0.5 kWh a 10 kWh com eficiência global situada entre 70% e 95%. Estes sistemas apresentam rápida resposta, da ordem de milissegundos, podendo atuar por até uma hora. Tais características os tornam adequados para aplicações de UPS e suporte à rede tais como qualidade de energia, regulação de frequência, compensação de afundamentos de tensão etc. (EPRI, 2010; ANDRADE JR., 2005). Nichos de aplicação incluem cargas críticas que requeiram alta estabilidade e qualidade no fornecimento de energia. Também podem ser aplicados em sistemas isolados (SEBASTIÁN; ALZOLA, 2012).

Tanto SMES quanto volantes de inércia supercondutores ainda apresentam alto custo, o que se deve às tecnologias de ponta envolvidas e aos materiais com elevado desempenho empregados (EPRI, 2010; DOE/EPRI, 2013). No entanto, o aumento da demanda por estas tecnologias pode reduzir o custo unitário dos dispositivos. Esta demanda pode aumentar com o crescimento da participação de fontes intermitentes na matriz energética e da geração distribuída e de *Smart Grids*.

As respostas às métricas associadas à estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I, indústria e mercado são apresentadas de forma resumida nos tópicos abaixo:

- Nota-se que os materiais supercondutores representam o uso de uma tecnologia de maior eficiência energética e de baixo impacto ambiental;
- É necessário que sejam estimuladas políticas regulatórias para a inovação tecnológica no setor elétrico nacional utilizando os materiais supercondutores;
- Existe a necessidade de criação de políticas de incentivos públicos e privados para que os cenários apresentados se materializem;
- O desenvolvimento das tecnologias supercondutoras representam um estímulo à cultura da inovação e ao empreendedorismo;
- A contribuição com novas tecnologias para viabilizar a expansão da geração intermitente e a expansão da transmissão;
- A contribuição para o fortalecimento da geração distribuída e projetos de *Smart Grid* através de diversas tecnologias supercondutoras;
- As tecnologias supercondutoras são intrinsicamente mais eficientes e potencializam uma menor emissão de CO_2 que os condutores convencionais, reduzindo a pegada ecológica na geração, transmissão e distribuição de energia nos locais instalados;
- O uso de tecnologias de ponta irá naturalmente motivar o ensino de ciências básicas para as futuras gerações, levando à formação de massa crítica;
- As aplicações de supercondutividade no setor elétrico representam um tema inovador, que pode ser publicado nos melhores veículos de divulgação científica e tecnológica nacionais e internacionais, incluindo também as publicações direcionadas à indústria e à produção de patentes;
- Devem ser estabelecidas parcerias para o desenvolvimento de projetos em âmbito internacional, visando à tropicalização de tecnologias mais complexas (p.e. cabos), e também intercâmbios que possam agregar conhecimento, para a futura nacionalização dessas tecnologias;
- Deve ser estimulado o desenvolvimento de projetos em escala laboratorial nas universidades e centros de pesquisa, antecipando o aumento da escala dos equipamentos;
- Deve haver a formação continuada de profissionais capacitados em nível de pós-graduação para a criação de massa crítica no Brasil e consolidação dos grupos de pesquisa em laboratórios na universidade, instituições de CT&I e empresas. Também deve ser fomentada a formação continuada de profissionais capacitados em nível de graduação e técnico para atender à demanda de profissionais na área que surgirá no Brasil;
- Devem ser fomentadas a expansão dos laboratórios já existentes nas universidades e instituições de CT&I e a formação de novos laboratórios;

- Deve haver uma maior aproximação entre os laboratórios e o setor industrial, visando à transferência de tecnologia para o setor produtivo;
- Devem ser criadas políticas de incentivo para a internacionalização dos grupos existentes, visando à diminuição do déficit tecnológico em relação aos grandes grupos internacionais. Em paralelo, devem ser estreitados os laços entre os grupos existentes no Brasil e as empresas do setor elétrico;
- As tecnologias de equipamentos supercondutores devem ser comercializadas em alguns nichos específicos de mercado. Atualmente, o maior potencial de produtos está nos cabos supercondutores e limitadores de corrente de curto-circuito;
- Devem haver políticas para o incentivo à cadeia produtiva de equipamentos supercondutores e acessórios e, também, à cadeia produtiva dos fios supercondutores.

6.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas

Neste capítulo, são abordadas as métricas de desenvolvimento e as curvas de evolução da maturidade tecnológica das rotas consideradas no projeto. Tais pontos são apresentados, por temática, nos itens subsequentes.

6.3.1. Temática materiais supercondutores de alta temperatura crítica

No estágio atual de desenvolvimento dos materiais supercondutores de alta temperatura crítica despontam como candidatos para a aplicações em dispositivos supercondutores as fitas supercondutoras de segunda geração (2G) de RE-$Ba_2Cu_3O_7$, em que RE são os elementos terra rara (Y, Nd, Gd, Eu) e os fios de Diboreto de Magnésio (MgB_2). Não foi analisada uma rota para Fita 1G, de primeira geração, porque a sua produção está sendo descontinuada em todo o mundo.

Roadmap tecnológico

Rota - Fitas de Alta Temperatura 2G

Estrutura multicamadas na forma de filmes fino. As fitas 2G são condutores compostos de um substrato fino metálico, de Hastelloy ou Ni-W, responsável pela estabilidade e rigidez mecânica. Sobre este substrato são depositadas camadas de passivação e texturização e sobre estas, o filme supercondutor de RE-Ba-Cu-O (REBCO), em que RE é um elemento terra rara ou uma mistura de terras

raras. Sobre o filme de REBCO deposita-se uma camada de prata para a proteção e a estabilização térmica e elétrica (CIGRÉ, 2015). Nas fitas atuais, predomina nas fitas comerciais o Y, que se encontra misturado a outros elementos terras raras como o Gd e o Eu. É importante ressaltar que no momento não existe produção de fitas 2G no Brasil, nem mesmo em escala laboratorial. Porém, pode ser um objetivo de longo prazo o desenvolvimento do processo de fabricação dessas fitas supercondutoras, cujos principais elementos são Y, Gd e Eu (CIGRÉ, 2015), como forma de agregar valor à produção, ainda incipiente, de elementos terras raras tais como: Y, Nd, Sm, Eu, Gd etc. O Brasil tem grandes reservas de elementos de terras raras (CGEE, 2013), podendo rivalizar com a China na sua produção. No Brasil, temos o domínio de todo o processo de mineração e extração dos terras raras, inclusive uma planta piloto para a produção de ímãs permanentes de Nd-Fe-B (CGEE, 2013).

O custo das fitas 2G é fator crucial para muitas aplicações. Estima-se, por exemplo, que para as aplicações envolvendo transmissão de energia elétrica e motores supercondutores o custo deva cair para 10 US $/kAm., o que, segundo algumas projeções, ocorrerá antes de 2050 (IEA, 2015; MARCHIONINI, 2016). Neste custo não está incluído o custo de refrigeração. Esta diminuição do custo se dará principalmente pelo aumento da corrente crítica das fitas 2G. Para aplicações em alto campo, >20T, o custo não é o problema e, sim, o aumento da resistência mecânica das fitas. Outra questão fundamental para aplicações em motores elétricos é a uniformidade da produção da fita e a sua resposta em campos elétricos elevados, ou seja, a eficiência do processo de produção que deve aumentar o aprisionamento de fluxo nos supercondutores, reduzir a perda AC e aumentar a uniformidade de produção, para que tenhamos pedaços contínuos com mais de 1 km (CIGRÉ, 2015).

Apesar de o YBCO maciço aparentemente ser mais fácil de preparar, ainda não se conseguiu produzi-lo industrialmente. Há apenas duas empresas no mundo que o produzem semiartesanalmente. Já a fabricação de fitas 2G está atingindo a sua maturidade, com várias empresas localizadas em vários países do mundo produzindo fitas 2G em escala semi-industrial. A evolução da maturidade dessa rota, no Brasil, pode ser observada no .

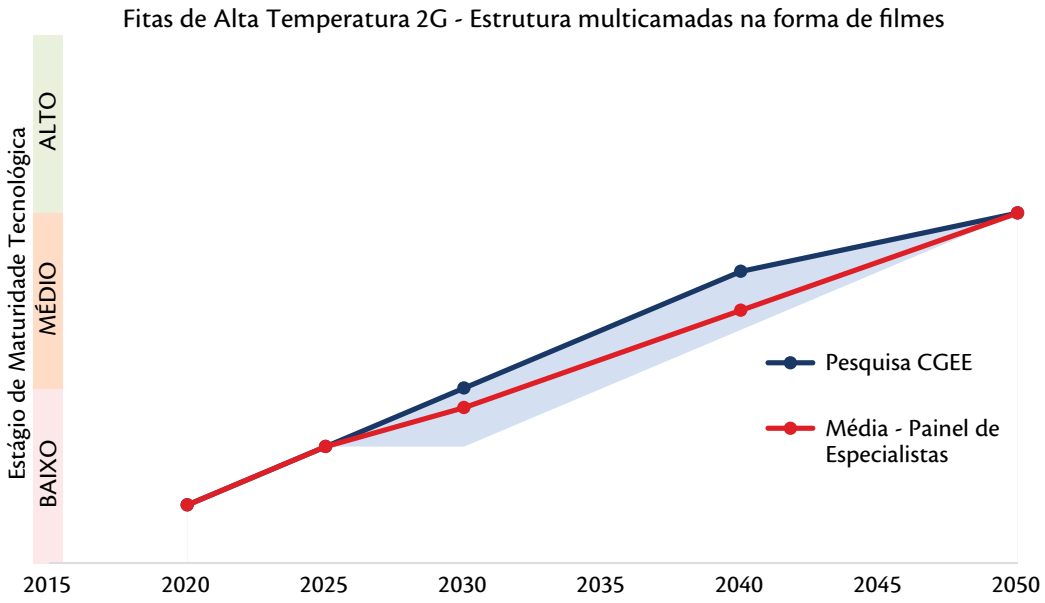

Gráfico 28 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Fitas de Alta Temperatura 2G - Estrutura de multicamadas na forma de filmes

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Processos de fabricação de fios MgB2

O MgB_2 é um composto supercondutor descoberto em 2001 com temperatura crítica de 39 K, sendo apropriado para ser utilizado a temperaturas menores que 27 K (IEA, 2013) em campos magnéticos moderados, abaixo de 5 T. Portanto, ele pode ser usado em banho de hidrogênio líquido (20 K) ou de hélio líquido (4, 2 K), porém tem sido utilizado com sistemas de refrigeração de ciclo fechado em temperatura da ordem de 20 K em campos magnéticos da ordem de 1,8 T (CIGRÉ, 2015). As principais aplicações para o MgB_2 são equipamentos de ressonância magnética nuclear e motores supercondutores.

Os materiais precursores do MgB_2, Mg e B, são baratos, representando entre 5% e 10% do custo (CIGRÉ, 2015). É um composto de baixa anisotropia e compatível com muitos metais e ligas, excetuando-se o cobre, sendo a confecção de fios multifilamentares pelo método poder *in tube* (PIT) relativamente simples. Existem duas técnicas de produção do MgB_2, *ex-situ* e *in-situ*. Na primeira, Mg e B são misturados e reagidos, formando o composto MgB_2, que é pulverizado e inserido nos tubos dos quais

serão extrudados os fios; na segunda, os pós de Mg e B são misturados e inseridos nos tubos dos quais serão extrudados os fios, que são enrolados na forma de bobinas e só então aquecidos para que a reação de formação do MgB_2 aconteça.

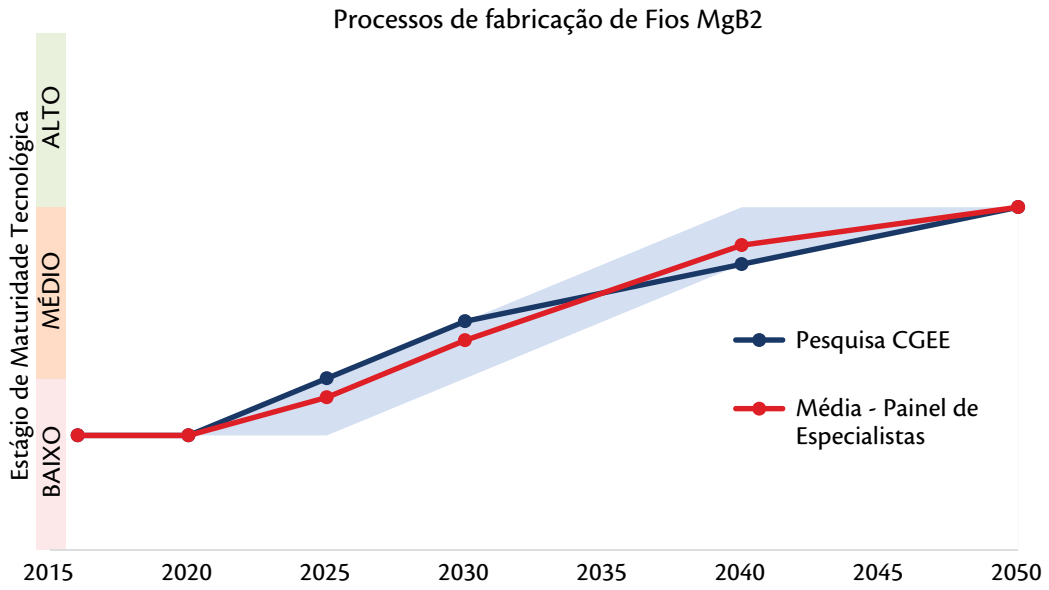

Gráfico 29 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Processos de Fabricação de Fios MgB_2

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Fitas de Alta Temperatura 2G e Evolução da Maturidade Tecnológica da Rota Processos de Fabricação de Fios MgB_2

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Materiais Supercondutores de Alta Temperatura Crítica	Fitas de Alta Temperatura 2G - Estrutura Multicamadas na Forma de Filmes Finos	Fatores portadores de futuro	Pesquisa básica Falta de investimentos em pesquisas básicas no Brasil Falta de grupos no tema no Brasil		Pesquisa ainda deve apresentar baixa evolução na maturidade, desmotivando investimentos	Tecnologia deve atingir nível máximo de maturidade no mundo, o que pode motivar a transferência de tecnologia para o Brasil		Tecnologia deve atingir nível máximo de maturidade no mundo, o que pode motivar a transferência de tecnologia para o Brasil
		Maturidade	BAIXO				MÉDIO	
	Fios Supercondutores de MgB2	Fatores portadores de futuro	Pesquisa básica Falta de investimentos em pesquisas básicas no Brasil Falta de grupos no tema no Brasil		Pesquisa ainda deve apresentar baixa evolução na maturidade, desmotivando investimentos	Tecnologia deve atingir nível máximo de maturidade no mundo, o que pode motivar a transferência de tecnologia para o Brasil		Tecnologia deve atingir nível máximo de maturidade no mundo, o que pode motivar a transferência de tecnologia para o Brasil
		Maturidade	BAIXO			MÉDIO		

Fonte: Elaboração própria.

6.3.2. Temática sistemas ancilares e isolantes

Roadmap tecnológico

Para que a tecnologia de equipamentos elétricos supercondutores possa ser viabilizada, é necessário que sejam desenvolvidos sistemas ancilares e isolantes criogênicos, sendo este o foco desta temática.

Rota - Sistemas de Refrigeração Criogênica para Equipamentos Supercondutores

Dispositivos com supercondutores de alta temperatura crítica (HTS) operam em temperaturas entre 20 K e 77 K, ou seja, entre -253 °C e -196 °C. Para esta faixa de temperatura, temos a possibilidade de usar um banho de alguns fluídos criogênicos: hidrogênio líquido (LH_2), na temperatura de ebulição de 20 K; neônio líquido (LNe), na temperatura de ebulição de 27 K; e nitrogênio líquido (LN_2), na temperatura de ebulição de 77 K (CIGRÉ 2015). Estes fluídos criogênicos são geralmente produzidos em refrigeradores de grande porte e armazenados no local ou produzidos *in-situ*. Os sistemas de refrigeração podem ser abertos ou fechados. Sistemas abertos são aqueles em que a refrigeração se dá em um banho do fluído criogênico e este é descartado quando evapora. Sistemas fechados podem operar em banho. Neste caso, o fluído criogênico é liquefeito quando evapora ou com o dispositivo conectado diretamente do refrigerador de ciclo fechado (*closed cycle refrigerator* ou *cryocooler*).

Os refrigeradores criogênicos, criogeradores, mais utilizados hoje são:

***EstGifford McMahon* GM:** sistema de ciclo regenerativo largamente utilizado atualmente com supercondutores de baixa temperatura crítica, como em sistemas de imagens por ressonância magnética (MRI). São sistemas com períodos longos sem a necessidade de manutenção (10 mil horas).

Tubo Pulsado (PT - pulse-tube): sistemas que operam em ciclo fechado, tendo He gasoso como fluído de trabalho, e que não têm nenhuma parte móvel. A refrigeração se dá por meio de ondas acústicas.

***Ciclo Stirling*:** refrigeradores muito utilizados em sistemas de grande porte. Desde 2000, estão disponíveis para uso em criogeradores de pequeno porte. Usam um único pistão na região da cabeça fria. Têm como inconveniente a alta vibração e o ruído.

Turbo *Brayton*: sistema eficiente apropriado para sistemas que necessitam de uma potência elevada de refrigeração, como em cabos supercondutores. Utiliza turbinas tanto na compressão quanto na expansão de fluído de trabalho.

Estes sistemas de refrigeração muitas vezes são utilizados para super-resfriar o fluído de trabalho, como no caso dos cabos supercondutores (IEA, 2015). A evolução da rota tecnológica pode ser observada no Gráfico 30.

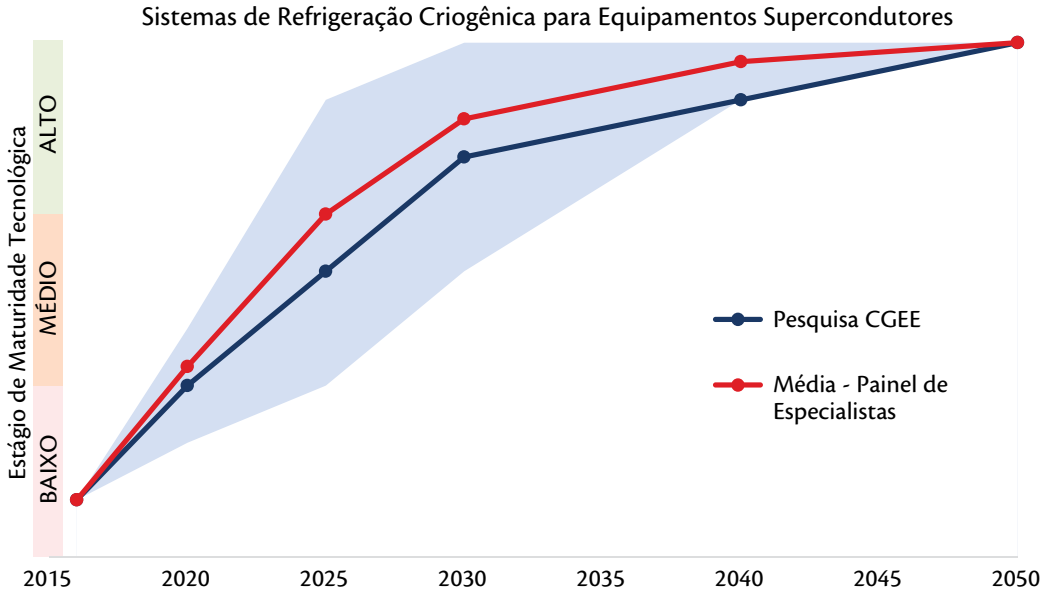

Gráfico 30 - Evolução da maturidade tecnológica da Rota Sistemas de Refrigeração Criogênica para Equipamentos Supercondutores

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Isolantes Elétricos para Baixas Temperaturas

Em geral, o isolamento elétrico de equipamentos HTS baseia-se em um sistema isolante a vácuo com espaçador sólido ou em isolantes sólidos imersos em um fluido de baixa temperatura (criogênico) (SAUERS, 2002). Normalmente, o fluido criogênico utilizado para refrigeração também atua como dielétrico. Fluidos como nitrogênio líquido, hélio gasoso e neônio líquido são empregados, dependendo da aplicação e da temperatura de operação (20-77 K). O nitrogênio líquido é o fluido mais empregado, principalmente em cabos, limitadores de corrente e transformadores supercondutores. O nitrogênio é quimicamente inerte, não apresentando efeitos nocivos para o meio ambiente, e não tem custos de descarte após o fim da vida útil, já que evapora (GERHOLD 2002a, 2002b). O líquido pode ser completamente reprocessado por evaporação e recondensação em sistemas de refrigeração com circuito fechado. A tecnologia de produção de fluidos criogênicos, já disponíveis no mercado nacional, é dominada por diversas empresas. Já as tecnologias de refrigeração em ciclo fechado, com a recuperação do fluido, serão tratadas em outra seção deste trabalho. A rigidez dielétrica nitrogênio líquido depende do controle de temperatura e pressão de operação (NISHIMACHI, 2012). O comportamento dielétrico do nitrogênio líquido é bem conhecido até tensões da ordem de 200 kV (NOE, 2016). Contudo, ensaios a tensões mais elevadas são necessários.

Isolantes sólidos são usualmente empregados como materiais estruturais em buchas e no isolamento de fitas supercondutoras a baixas temperaturas. Esses materiais são frequentemente usados juntamente com vácuo, nitrogênio líquido ou outros fluidos criogênicos. Materiais já existentes comercialmente e utilizados para outros fins têm sido adaptados e utilizados em equipamentos supercondutores. Os mais comuns são: filme de polipropileno (PPLPTM), polietileno poroso (Tyvek®), papel de poliamida (Nomex®), filme de poliimida (Kapton®), álcool polivinílico (PVA), polimetil metacrilato (PPMA), polivinil butiral (PVB) e poliamida 66 (PA66) (TUNCER, 2009). A maior parte destes isolantes é fabricada no exterior. Tyvek®, Nomex® e Kapton® são marcas registradas da Dupont. Polímeros mais comuns como o polietileno são fabricados no Brasil. A questão é se seria interessante nacionalizar esses materiais ou continuar a importá-los. Esta avaliação depende de um estudo mais específico. Atualmente, para a construção de protótipos de equipamentos supercondutores nacionais, pode-se importar esses materiais isolantes e/ou comprá-los de fornecedores nacionais. No entanto, há também pesquisas para o desenvolvimento de novos materiais isolantes para temperaturas criogênicas, especialmente nanocompósitos isolantes à base de matriz polimérica com dispersão de nanopartículas (HAYAKAWA, 2012). Neste campo, pode ser interessante realizar pesquisas no Brasil. A evolução da rota no País pode ser verificada no Gráfico 31.

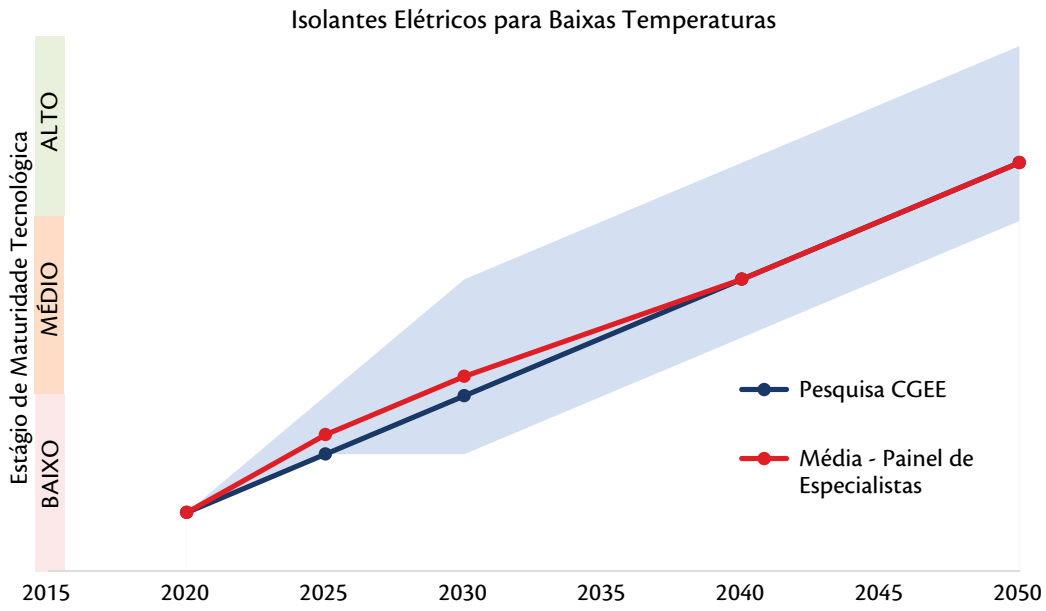

Gráfico 31 - Evolução da maturidade tecnológica da Rota Isolantes Elétricos para Baixas Temperaturas

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na tabela 19.

Tabela 19 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistemas de Refrigeração Criogênica para Equipamentos Supercondutores e Isolantes Elétricos para Baixas Temperaturas

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Sistemas Ancilares e Isolantes	Sistemas de Refrigeração Criogênica para Equipamentos Supercondutores	Fatores portadores de futuro	Pesquisa básica Falta de investimentos em pesquisas básicas no Brasil Falta de mão de obra qualificada		Falta de mão de obra qualificada	Falta de mão de obra qualificada		Incentivo à formação de mão de obra pode reduzir a defasagem tecnológica
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		
	Isolantes Elétricos para Baixas Temperaturas	Fatores portadores de futuro	Falta de mão de obra especializada Falta de criostatos adequados para ensaios de alta tensão em temperaturas criogênicas		Falta de mão de obra especializada	Incentivo à formação de mão de obra pode reduzir a defasagem tecnológica		Produção de isolantes criogênicos comerciais no Brasil
		Maturidade	BAIXO				MÉDIO	ALTO

Fonte: Elaboração própria.

6.3.3. Temática aplicações da supercondutividade no setor elétrico de potência

A presente temática identifica as aplicações de supercondutividade em sistemas elétricos de energia. Foram levantadas seis rotas de aplicações, as quais foram divididas em dois grupos, para facilitar a análise.

Roadmap tecnológico

São apresentados a seguir os argumentos que fundamentaram a evolução da maturidade das rotas tecnológica desta temática.

Rota - Limitadores de Corrente Supercondutores

A inserção de novas usinas geradoras não previstas previamente na construção do sistema atual, o aumento de interconexões do sistema elétrico e as usinas próximas a centros urbanos contribuem para o aumento dos níveis da corrente de curto-circuito (DE SOUSA, 2012; CIGRÉ, 2012). Desse modo, temos a superação da capacidade dos equipamentos (transformadores, barramentos, disjuntores etc.), ou seja, equipamentos que não foram projetados para suportar os novos e elevados níveis de corrente de curto-circuito.

Limitadores de corrente supercondutores são dispositivos capazes de atenuar, ou até mesmo de bloquear, picos de corrente com rapidez suficiente para que os disjuntores possam então atuar com segurança (NOE, 2007). Deste modo, a aplicação desses dispositivos apresenta-se como solução de longo prazo, mantendo e aumentando a estabilidade, a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica, além de prolongar a vida útil dos equipamentos superados.

Vários tipos de limitadores de corrente supercondutores têm sido instalados e testados na rede ao longo de mais de 10 anos, e os primeiros comerciais já foram instalados (NOE, 2016). Em grande parte, são dispositivos para média tensão (distribuição), mas existem projetos e desenvolvimentos para alta tensão, com destaque para o limitador de núcleo saturado de 220 kV instalado na China e o projeto de desenvolvimento de um para 500 kV no mesmo País (CIGRÉ, 2015). Um dispositivo de 154 kV está sendo testado para a aplicação em linhas de transmissão na Coreia do Sul (LEE, 2017). A evolução desta rota é demonstrada no Gráfico 32.

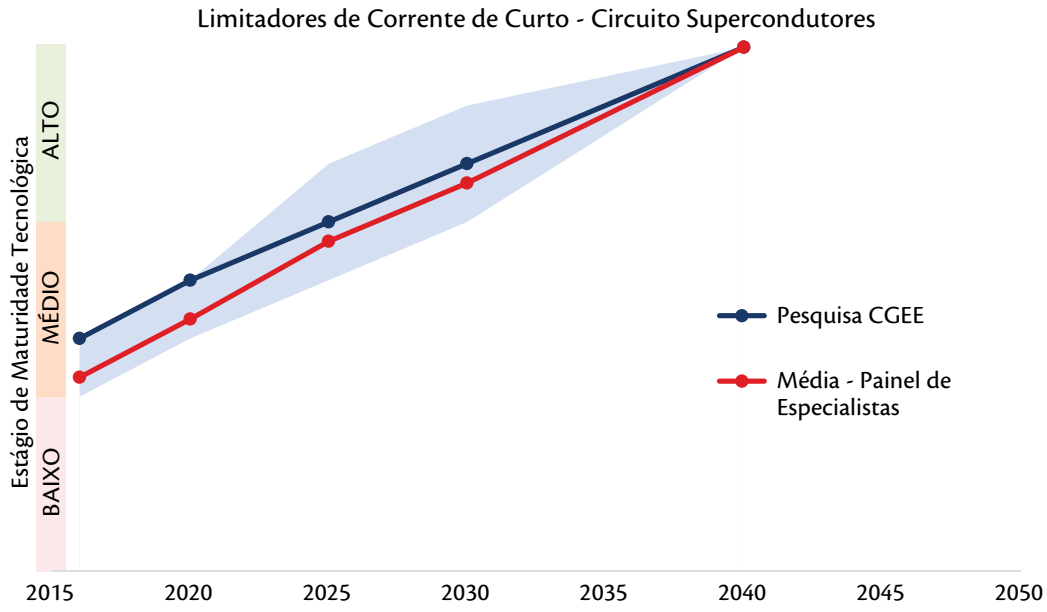

Gráfico 32 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Limitadores de Corrente de Curto-circuito Supercondutores

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Cabos Supercondutores

Apresentam alta eficiência e elevada ampacidade, podendo transportar de duas a nove vezes mais corrente que os cabos convencionais com as mesmas dimensões, dependendo da configuração do cabo. Em linhas gerais, há três configurações de cabos supercondutores, que variam de acordo com a disposição das três fases em um duto criogênico termicamente isolado:

1) Núcleo único (*single core*): cada fase é alojada em um duto individual;
2) Trifásico a três condutores (*three core*): três fases alojadas em um único duto;
3) Triaxial: três fases coaxiais alojadas em um único duto.

Devido a questões de isolamento elétrico, a configuração de núcleo único é indicada para transmissão, enquanto que a trifásica alcança tensões de subtransmissão e a triaxial é mais adequada para distribuição.

A alta ampacidade dos cabos supercondutores os torna vantajosos para a aplicação em linhas subterrâneas de áreas urbanas em que haja limitações para a expansão da rede ou para o aumento da carga em trechos congestionados. Além de ocuparem menos espaço que os cabos convencionais, praticamente não emitem calor e campos magnéticos, possibilitando um melhor aproveitamento de dutos subterrâneos (HASSENZAHL, 2004). Com isso, possibilitam evitar a ampliação ou a construção de novas infraestruturas para a passagem dos cabos, pois os dutos subterrâneos já existentes podem continuar a ser utilizados e ainda serão capazes de transmitir maiores quantidades de energia elétrica. Esta é uma excelente possibilidade, principalmente para as áreas densamente povoadas, onde o custo de construção de novos túneis e dutos é elevado, sem contar as questões relacionadas às restrições de faixas de servidão para a passagem de linhas de transmissão. Cabos supercondutores também permitem a redução da tensão para uma dada potência, minimizando o número de subestações e as perdas totais na rede, o que está sendo demonstrado pelo projeto Ampacity, com a instalação de um cabo supercondutor no centro da cidade de Essen, na Alemanha (STEMMLE, 2013). Este cabo foi acoplado a um limitador de corrente supercondutor.

Em vista dessas qualidades, vários projetos ao redor do mundo têm sido desenvolvidos e muitos deles já mostram bons resultados, para aplicações tanto em distribuição, quanto em transmissão. Atualmente, há cabos supercondutores para distribuição e transmissão, podendo alcançar a tensão de 275 kV e potência de 1, 5 GW (OHKUMA, 2013). O nível de tensão e a potência dependem da configuração e do isolamento elétrico do cabo. Após mais de 10 anos de experiência acumulada em diversos países, não se observou degradação dos cabos (NOE, 2016).

No Brasil, houve um projeto P&D Aneel de cabo supercondutor, sendo o único projeto nacional desta tecnologia do qual se tem conhecimento. Trata-se de uma proposta para desenvolvimento de um protótipo de aproximadamente cinco metros. No entanto, não são conhecidos os resultados demonstrando a concretização do cabo proposto, o que pode ser atribuído, em parte, à ausência de um fabricante de cabos no projeto. Um projeto de desenvolvimento de cabo de transmissão ou de distribuição requer a participação de ao menos um fabricante, dada a complexidade e a sofisticação dos processos de fabricação, mesmo quando se trata de cabos convencionais. Mesmo que seja criada uma planta piloto para a fabricação de um cabo, a sua instalação e operação teriam que envolver engenheiros e técnicos com experiência na produção de cabos, ou seja, que tenham o *know-how* da indústria nesta área.

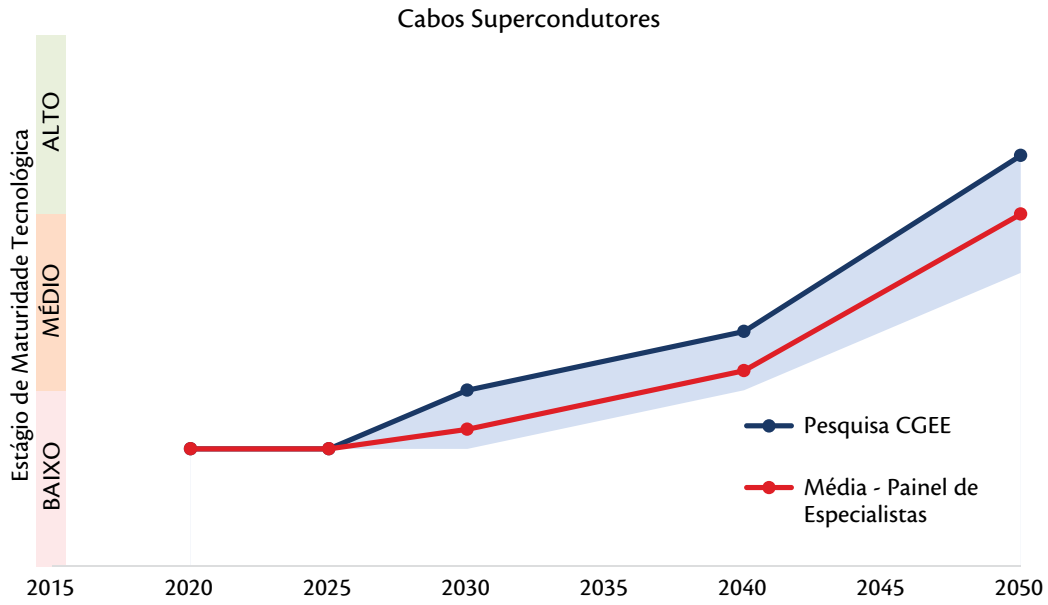

Gráfico 33 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Cabos Supercondutores

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Aerogeradores Supercondutores

Atualmente, uma das aplicações mais promissoras das máquinas rotativas supercondutoras é na fabricação de aerogeradores com potência igual ou superior a 10 MW e peso e dimensões próximos aos de aerogeradores convencionais de 5 MW. Deste modo, tais aerogeradores de alta potência podem ser aplicados tanto a sistemas *onshore* quanto *offshore*. Prevê-se que aerogeradores eólicos supercondutores alcançarão a comercialização em 2030 (IEA, 2015).

A energia eólica é a fonte que mais cresce na matriz energética nacional. O Plano Decenal de Energia (PDE) (EPE, 2014) mostra que o Brasil possuía, em 2013, uma capacidade instalada de 2.191 MW, e indica que esta capacidade pode chegar a 22.439 MW, em 2023 (CGEE, 2015). O desenvolvimento dessa tecnologia no Brasil pode ser observado segundo o grau de maturidade apresentado no Gráfico 34.

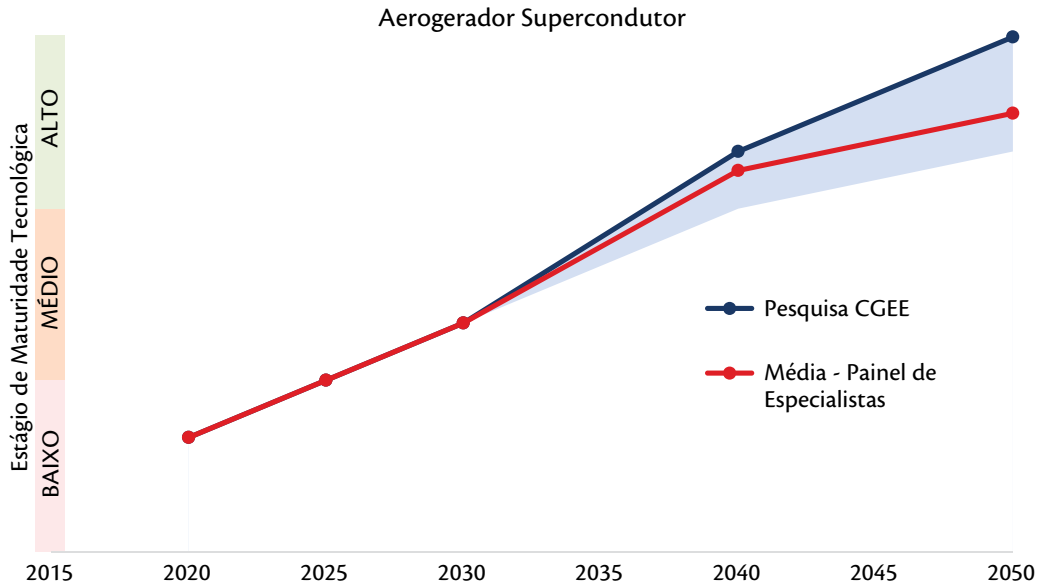

Gráfico 34 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Aerogerador Supercondutor

Fonte: Elaboração própria.

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 Limitadores de Corrente Supercondutores, Cabos Supercondutores e Aerogeradores Supercondutores

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Aplicações da Supercondutividade no Setor Elétrico de Potência	Limitadores de Corrente Supercondutores	Fatores portadores de futuro	Aneel lançou P&D estratégico de equipamentos supercondutores Os grupos de pesquisa possuem experiência acumulada no tema Conservadorismo do setor elétrico às novas tecnologias		É a tecnologia nacional com maior grau de maturidade Conservadorismo do setor elétrico às novas tecnologias	O alto nível de desenvolvimento internacional pode estimular o mercado interno		O alto nível de desenvolvimento internacional pode estimular o mercado interno
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
	Cabos Supercondutores	Fatores portadores de futuro	Aneel lançou P&D estratégico de equipamentos supercondutores Os grupos de pesquisa possuem experiência acumulada no tema Conservadorismo do setor elétrico às novas tecnologias		É uma tecnologia com grande interesse para o setor elétrico Conservadorismo do setor elétrico às novas tecnologias	O alto nível de desenvolvimento internacional pode estimular o mercado interno		O alto nível de desenvolvimento internacional pode estimular o mercado interno
		Maturidade	BAIXO				MÉDIO	ALTO
	Aerogeradores Supercondutores	Fatores portadores de futuro	Pesquisa básica Falta de investimentos em pesquisas básicas no Brasil Aneel lançou P&D estratégico de supercondutores		Pesquisa ainda deve apresentar baixa evolução na maturidade Demanda do mercado por geradores eólicos de alta potência	Expansão das fontes renováveis deve continuar A evolução da tecnologia no cenário internacional pode motivar o mercado interno Tecnologia será possivelmente tropicalizada		Evolução da tecnologia no exterior pode motivar o mercado interno
		Maturidade	BAIXO			MÉDIO	ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

Roadmap tecnológico

Rota - Armazenadores de energia com bobinas supercondutoras (SMES)

Em termos de Brasil, o estudo de SMES se limitou até o momento a casos de simulações do SMES e seu controle na rede (MOLINA *et al.*, 2011) ou na construção de protótipos de bancada de bobinas supercondutoras que podem ser escalonadas para futuros projetos de bobinas de armazenadores magnéticos de energia (DIAS *et al.*, 2015).

Em termos internacionais, vários projetos para a demonstração da tecnologia já foram desenvolvidos. Inclusive os dispositivos SMES já foram produtos comerciais no passado com tecnologia de supercondutores de baixa temperatura crítica (Nb-Ti). Em 1997, a American Superconductor (http://www.amsc.com/) adquiriu a *start up Superconductivity* Inc., que havia sido fundada em 1987 e que realizava projetos de bobinas supercondutoras utilizando fios de Nb-Ti. Iniciou-se o projeto intitulado de D-SMES, que instalou em algumas subestações dispositivos SMES com 2, 4 MJ e 3 MW usados para a compensação de potências ativas e reativas (BUCKLES; HASSENZAHL, 2000). Todavia, essa tecnologia não se mostrou viável economicamente. Mais recentemente, nenhum dos projetos de SMES que surgiram tiveram a pretensão de ser um produto comercial. Os projetos apresentados usam fitas supercondutoras de primeira geração (1G), fitas supercondutoras de segunda geração (2G) e fios de MgB_2, que são mais interessantes para as aplicações elétricas em termos comerciais. O Gráfico 35 mostra a evolução desta rota em nível nacional.

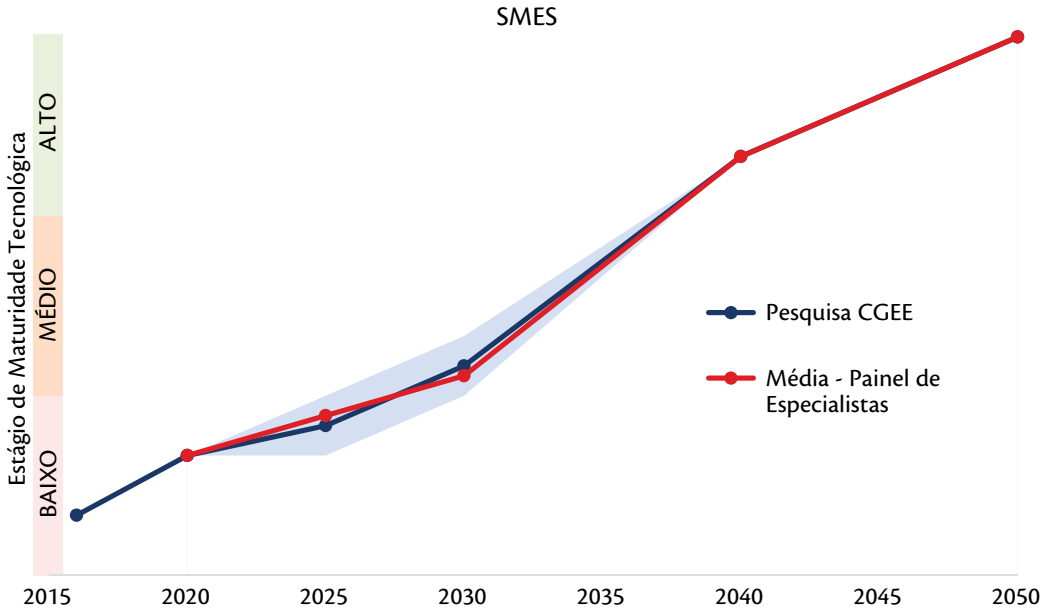

Gráfico 35 - Evolução da maturidade tecnológica da rota SMES

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Armazenadores cinéticos de energia com mancais supercondutores - *Flywheels*

Na temática supercondutividade, as pesquisas acadêmicas na área de mancais magnéticos supercondutores (MMS) apresentam-se bastante evoluídas, sendo inclusive o Brasil referência internacional no tema. Os primeiros trabalhos realizados foram dedicados à demonstração do fenômeno de levitação supercondutora em protótipos de escala reduzida e à modelagem de MMSs, com sua respectiva validação. Esta modelagem torna-se necessária para o design de novos mancais, cujas ferramentas de projetos estão plenamente dominadas em âmbito nacional, pois o tema foi profundamente estudado em teses de doutorado (SOTELO, 2007; DIAS, 2009). Nesses trabalhos, os modelos estudados para a simulação de MMSs foram validados por meio de comparação com experimentos realizados em diversos protótipos em escala laboratorial.

A prova de que os MMSs podem ser usados para levitar grandes massas foi obtida com o projeto MagLev-Cobra, que é capaz de levitar cargas superiores a três mil toneladas, em um veículo com seis metros de comprimento (MATTOS, 2016). A tecnologia presente nos MMSs rotativos (usados nos

armazenadores cinéticos de energia) e lineares (usados em veículos de levitação magnética, MagLev) é, na verdade, a mesma, mudando apenas a topologia adotada. Como exemplo da maturidade da tecnologia de MMS no Brasil, o projeto MagLev-Cobra encontra-se em um nível sete na escala TRL (STEPHAN, 2017). Em termos de mancais rotativos, protótipos de MMSs capazes de fornecer forças superiores a 10 kN já foram apresentados na literatura (WALTER, 2006).

Diversos trabalhos de mancais magnéticos com blocos supercondutores maciços aplicados a dispositivos *Flywheels* vêm sendo apresentados por pesquisadores brasileiros (SOTELO 2005; ANDRADE, 2005; SOTELO, 2007; ANDRADE, 2007; STEPHAN, 2008; SOTELO, 2009; SOTELO, 2016). Em termos internacionais, a *Boeing* desenvolveu um *Flywheel* em maior escala com 5 kWh e 3 kW (STRASIK, 2010) usando MMSs, corroborando que a tecnologia é plenamente aplicável para armazenamento de energia em bancos. Sistemas criogênicos para esses mancais também foram desenvolvidos e testados e mostraram-se eficientes (WERFEL, 2011); foi apresentado inclusive um protótipo de volante de inércia com MMS desenvolvido para 5 kWh/250 kW (WERFEL, 2007).

Existem dois tipos de armazenadores cinéticos de energia: *Flywheels* com grande momento de inércia e baixa velocidade e *Flywheels* com baixo momento de inércia e alta velocidade. Como a energia armazenada varia linearmente com o momento de inércia e é proporcional ao quadrado da velocidade angular, os *Flywheels* de alta velocidade (n > 10.000 rpm) tornam-se mais atrativos para produtos comerciais, principalmente por possuírem uma densidade de potência e de energia muito superior à daqueles de baixa velocidade. Uma necessidade dos *Flywheels* de alta velocidade é a utilização de mancais magnéticos, pois a dissipação de energia nos mancais mecânicos pode inviabilizar a operação dos armazenadores de energia com maior velocidade. Como os mancais supercondutores representam uma das tecnologias mais promissoras para esse tipo de aplicação, é importante destacá-la neste cenário.

Os MMSs geralmente usam blocos supercondutores massivos, que podem apresentar problemas mecânicos se não forem bem conservados. Destaca-se o fato de não ter sido possível ainda industrializar a produção desses materiais e obter preços competitivos. Também é um problema para o desenvolvimento de MMSs a existência atual de apenas duas microempresas que fabricam e comercializam esses materiais no mundo. Paralelamente, as fitas supercondutoras de segunda geração (2G) evoluíram seus processos de produção nos últimos anos. Também existem aproximadamente 10 empresas que fabricam fitas 2G em mais de centenas de metros. É importante ainda mencionar que as fitas 2G são mecanicamente muito mais robustas que os blocos e que elas usam muito menos material supercondutor em sua fabricação. Neste contexto, as fitas 2G podem ser empilhadas para formar um bloco e assim substituir os supercondutores massivos. Vários trabalhos foram propostos por grupos brasileiros nessa linha para desenvolvimento de MMSs com fitas 2G (SASS *et. al*, 2012,

2013, 2014, 2015a, 2015b), sendo também tema de uma tese de doutorado (SASS, 2015). Estas pesquisas apontaram que as próximas gerações de MMSs utilizarão as fitas 2G em sua fabricação.

Sobre a evolução da tecnologia no cenário nacional, em curto prazo espera-se que sejam realizadas pesquisas aplicadas de MMS para *Flywheels* com fitas 2G. Em médio prazo, devem ser desenvolvidos projetos de cabeça de série de *Flywheels* de alta velocidade com mancais magnéticos (supercondutores, magnéticos ativos ou híbridos), já com implementação na rede para compensação de potência ativa e reativa conectadas a cargas críticas. Ainda em médio prazo, com a evolução da maturidade dessa tecnologia, espera-se que alguma empresa brasileira se interesse pela produção de um lote protótipo para inserção de armazenadores cinéticos na rede. Somente em longo prazo, é possível esperar que bancos de *Flywheels* sejam utilizados em sistemas de energia de maior potência.

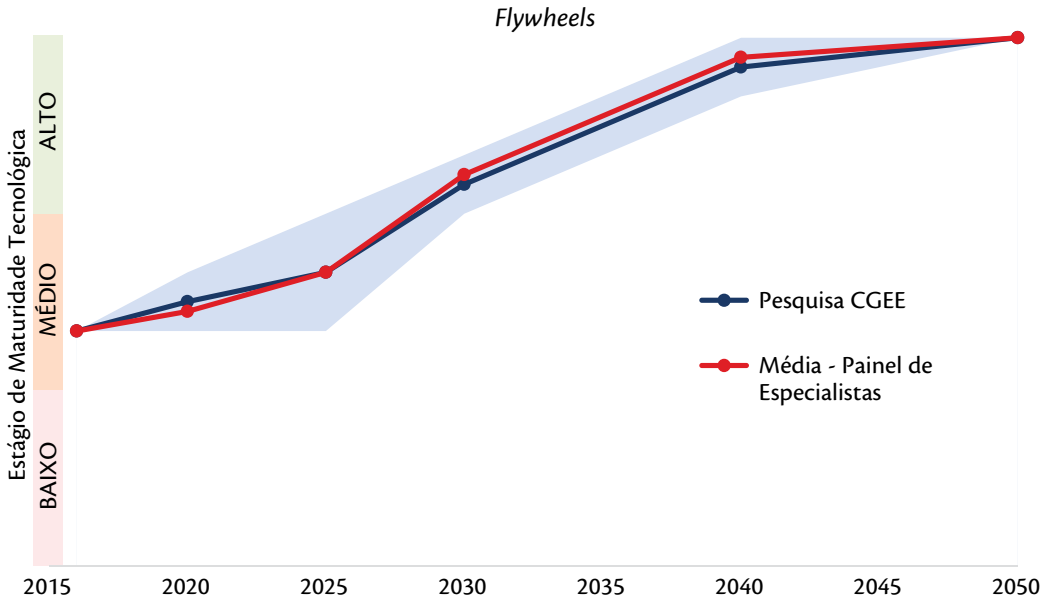

Gráfico 36 - Evolução da maturidade tecnológica da rota ***Flywheels***

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Transformadores Supercondutores

Nas aplicações de supercondutores em equipamentos elétricos, os transformadores supercondutores representam uma das linhas de menor evolução tecnológica em todo o mundo. Em termos de Brasil, o

cenário não é diferente, pois nenhum projeto de grande escala foi realizado. No conhecimento dos autores, em termos de Brasil, o único estudo de transformadores supercondutores foi realizado pelos pesquisadores do Cepel e da UFF em um projeto de um transformador supercondutor de escala reduzida, que teve um aporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no edital universal na faixa até R$ 30 mil. O projeto foi intitulado de "Desenvolvimento de um Transformador-Limitador de Corrente de Curto-Circuito com Fios Supercondutores de Segunda Geração". Com os recursos recebidos, foi possível realizar diversas simulações e estudar as bobinas com fitas supercondutoras de segunda geração com diferentes tipos de isolamento e inclusive sem isolamento. Ainda foi construído um protótipo em escala reduzida de um transformador 2:1 de prova de conceito. Os resultados estão apresentados em uma dissertação de mestrado (DIAS, 2016) e em um trabalho de conclusão de curso (MACHADO JR., 2015). A evolução da maturidade desta rota pode ser observada no Gráfico 37.

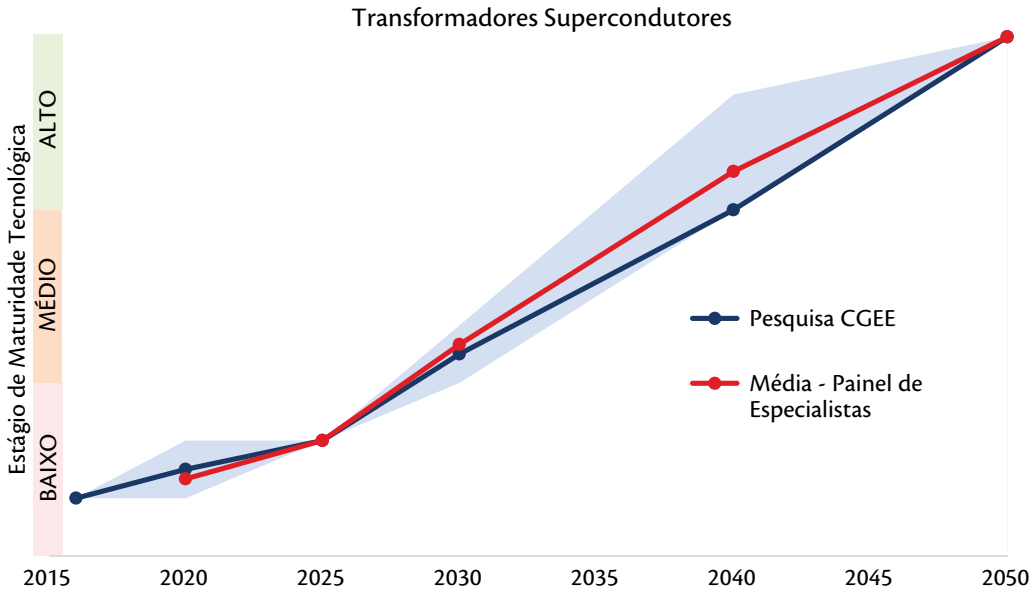

Gráfico 37 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transformadores Supercondutores

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas tecnológicas são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Fatores portadores de futuro de evolução das rotas SMES, ***Flywheels*** e Transformadores Supercondutores

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Aplicações da Supercondutividade no Setor Elétrico de Potência	Armazenadores de energia com bobinas supercondutoras (SMES)	Fatores portadores de futuro	Pesquisa básica Falta de investimentos em pesquisas básicas no Brasil Aneel lançou P&D estratégico na área de armazenamento de energia	Demanda de mercado por armazenamento de energia, motivada por geração solar e eólica Pesquisa ainda deve apresentar baixa evolução na maturidade		Expansão das fontes renováveis deve continuar A evolução da tecnologia no cenário internacional pode motivar o mercado interno Tecnologia será possivelmente tropicalizada		Evolução da tecnologia no exterior pode motivar o mercado interno
		Maturidade	BAIXO			MÉDIO		
	Armazenadores cinéticos de energia com mancais supercondutores (Flywheels)	Fatores portadores de futuro	Aneel lançou P&D estratégico na área de armazenamento de energia	Demanda de mercado por armazenamento de energia motivada por geração solar e eólica		Expansão das fontes renováveis deve continuar		Evolução da tecnologia no exterior pode motivar o mercado interno
		Maturidade	MÉDIO				ALTO	
	Transformadores Supercondutores	Fatores portadores de futuro	Pesquisa básica Falta de investimentos em pesquisas básicas no Brasil P&D estratégico de supercondutores	Pesquisa ainda deve apresentar baixa evolução na maturidade, desmotivando investimentos A evolução da tecnologia no cenário internacional pode motivar atividades de pesquisas básicas no Brasil		Conservadorismo do setor elétrico pode dificultar projetos pilotos A evolução da tecnologia no cenário internacional pode motivar P&Ds no Brasil		A evolução da tecnologia no cenário internacional pode motivar o mercado interno A vida útil esgotada de muitos transformadores instalados no sistema pode motivar a troca, caso existam equipamentos comerciais disponíveis com a nova tecnologia
		Maturidade	BAIXO				MÉDIO	

Fonte: Elaboração própria.

6.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), 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 22.

Tabela 22 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Supercondutores

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Limitadores de Corrente de Curto-circuito Supercondutores	Aplicações da Supercondutividade no Setor Elétrico de Potência
2	Cabos Supercondutores	Aplicações da Supercondutividade no Setor Elétrico de Potência
3	Aerogeradores Supercondutores	Aplicações da Supercondutividade no Setor Elétrico de Potência
4	Sistemas de Refrigeração Criogênica para Equipamentos Supercondutores	Sistemas Ancilares e Isolantes
5	Armazenadores de Energia Supercondutores (Flywheel)	Aplicações da Supercondutividade no Setor Elétrico de Potência
6	Fitas de Alta Temperatura 2G - estrutura multicamadas na forma de filmes finos	Materiais Supercondutores de Alta Temperatura Crítica
7	Transformadores Supercondutores	Aplicações da Supercondutividade no Setor Elétrico de Potência
8	Isolantes Elétricos para Baixas Temperaturas	Sistemas Ancilares e Isolantes
9	Armazenadores de Energia Supercondutores (SMES)	Aplicações da Supercondutividade no Setor Elétrico de Potência
10	Processos de Fabricação de Fios MgB2	Materiais Supercondutores de Alta Temperatura Crítica

Fonte: Elaboração própria.

A prioridade apresentada na Tabela 22 são elencados motivos que suportam a devida classificação.

Os motivos que suportam a prioridade apresentada na Tabela 22 são apresentadas a seguir:

1) O motivo da escolha da rota limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores como prioritária foi o alto grau de evolução dessa tecnologia no mundo e no Brasil, o que permite a sua inserção de maneira mais imediata nos sistemas de energia elétrica;

2) Da mesma forma, os cabos supercondutores têm alto grau de evolução no mundo e grande apelo para a sua inserção no sistema elétrico brasileiro, justificando a sua alta priorização;

3) Os aerogeradores supercondutores têm um grau de desenvolvimento menor que os anteriores, todavia comercialmente são estratégicos devido à necessidade de melhor aproveitamento do potencial eólico nacional;

4) Para que seja possível que os dispositivos supracitados sejam totalmente nacionalizados, é fundamental que as tecnologias de refrigeração criogênicas sejam dominadas;

5) Com a expansão da geração distribuída, em sua maioria composta por fontes renováveis, surge a necessidade de sistemas de armazenamento energético. Como o Flywheel apresenta maturidade baixa para média, esta tecnologia se torna interessante para ser desenvolvida no Brasil;

6) As pesquisas na fabricação de fitas 2G inexistem no Brasil, porém o domínio dessa tecnologia é fundamental para o desenvolvimento de outras rotas. Outro ponto importante é a disponibilidade de terras raras no Brasil;

7) Os transformadores são menos prioritários devido aos problemas apresentados pelos primeiros protótipos no mundo;

8) Para que se tenha o domínio completo de todo o ciclo, também é necessário desenvolver esta rota;

9) O grande problema desta rota está na dificuldade de fabricar a chave térmica, o que tira o peso de sua prioridade;

10) Os fios de diboreto de magneto provavelmente serão úteis para outras aplicações que não somente no sistema elétrico.

Capítulo 7

Capítulo 7

Macrotemática Estruturas, Condutores e Isoladores

A macrotemática tem uma visão geral sobre a evolução das linhas aéreas de transmissão no Brasil nos próximos 30 anos, em especial dos três componentes básicos que as compõem: condutores, isoladores e estruturas. Nessa abordagem, será apresentada a estimativa dos tipos de estudos principais, pesquisas e desenvolvimentos que deverão ser elaborados para atender o aprimoramento tecnológico desses componentes.

Sabe-se que o Brasil possui um dos sistemas de transmissão mais amplos e variados do mundo. Daí advém a sua complexidade, considerando-se a sua dimensão e as consequentes extensões de linhas de transmissão, além de diferentes níveis de tensão, tanto em CA quanto em CC. Em CA, existem implantados atualmente os níveis de tensão 138, 230, 345, 440, 500 e 765 kV, enquanto que em CC as tensões de 600 kV e 800 kV são as existentes. A par disso, os componentes básicos condutores, isoladores e estruturas serão aqui considerados, dada a sua importância e os respectivos custos.

As principais fontes de informação aqui utilizadas são os órgãos de planejamento e operação existentes no Brasil como a EPE, o Operador Nacional de Sistema Elétrico (ONS), a Aneel e o MME, além dos organismos nacionais e internacionais de estudos e desenvolvimento de sistemas elétricos, como o Cigré, o IEEE e a *International Conference on Eletricity Distribution* (Cired) etc. Também o constante crescimento das economias e a consequente necessidade de energia elétrica contribuem para que se vislumbre uma rede de linhas de transporte de energia elétrica sempre crescente dentro do horizonte avaliado.

Quatro temáticas foram cuidadosamente escolhidas, de forma a englobar cada um dos temas correlatos ou complementares, como materiais, tecnologias de projeto, tecnologias de montagem e manutenção e desempenho. Este enquadramento está de acordo com a realidade das linhas aéreas de transmissão e os componentes selecionados.

7.1. Visão de futuro

7.1.1. Cenário setorial

O cenário de crescimento das necessidades de transmissão, em termos de potência transmitida e extensão das linhas, continuará em franca ascensão até 2050. As modalidades de transmissão em CA ou CC em longo prazo continuarão convivendo uma com a outra e sua economicidade deverá ser estudada em cada caso específico. Condutores e estruturas, por seu peso no custo das linhas de transmissão, terão sempre pesquisas e inovações destinadas não só à redução dos custos, mas também ao menor impacto no meio ambiente. Continuarão em franco desenvolvimento, com tipos novos, mais econômicos e suficiente confiabilidade surgindo e competindo no mercado.

As informações e proposições aqui apresentadas se baseiam em estudos existentes ou em elaboração no âmbito de organismos técnicos como o Cigré, e em levantamento de tendências junto a fabricantes, empresas de engenharia de transmissão, construtoras e mantenedoras de linhas de transmissão. Também as pesquisas em andamento em grandes laboratórios ou no campo foram levadas em conta.

Também se buscará a pesquisa do estado de vida dos componentes das linhas, por meio do diagnóstico e da determinação da vida remanescente das linhas aéreas existentes. Pode-se prever que até 2050 o nível de tensão CA de 1000/1200 kV será implantado. Outro ponto importante continuará sendo o reaproveitamento das linhas existentes, com seu diagnóstico, determinação da vida remanescente e total reaparelhamento, como se fora uma linha nova. Isso gerará a necessidade de várias atividades de PD&I.

7.1.2. Objetivo geral

Esta macrotemática, do ponto de vista tecnológico, compreende três componentes fundamentais das linhas aéreas de transmissão, que se manterão em contínuo desenvolvimento, necessitando e gerando muito investimento em PD&I. Ressalte-se que, no caso particular de linhas aéreas, são necessárias pesquisas em laboratórios e no campo, onde por vezes se requerem vãos longos, inviáveis de se obter em laboratórios. Novas concepções de linhas e de seus componentes, além do estudo e do diagnóstico de linhas existentes, serão objeto de desenvolvimento, visando aumentar a sua confiabilidade, diminuir seus custos e prolongar a sua vida. Ressalte-se, outrossim, o contínuo aumento de capacidade que se requer das linhas de transmissão, o que implica o uso de novos tipos de condutores e estruturas.

7.1.3. Objetivo específico

Curto prazo (2017-2020):

- Uso mais intensivo de novos tipos de condutores;
- Uso de condutores utilizando ligas condutoras diversas, com relações H/w (relação tração sobre peso) mais favoráveis no sentido de redução das vibrações e aumento de sua vida útil;
- Otimização de projetos de linhas de transmissão, sendo considerada a influência de linhas existentes;
- Projetos de estruturas, sendo considerados os carregamentos dinâmicos.

Médio prazo (2020-2030):

- Metodologias para a determinação da vida remanescente de linhas existentes por meio de diagnósticos mais precisos proporcionados por novas tecnologias;
- Projetos pilotos para a avaliação da aplicação da nanotecnologia em isoladores poliméricos;
- Estudo e medições de aterramento impulsivo de linhas de transmissão para melhorar a previsão do desempenho das LTs.

Longo prazo (2030-2050):

- Uso de estruturas de polímero ou híbridas (polímero + metálicas) para reduzir seu peso e incrementar seu aspecto visual;
- Uso, em caráter experimental, de supercondutores com perdas reduzidas, causando uma ruptura tecnológica de grande impacto.

7.1.4. Fundamentação

Ao se abordar a espinha dorsal das linhas aéreas, aqui caracterizada pela macrotemática, pode-se prever a necessidade inquestionável de seu contínuo aprimoramento e melhoria e de uma busca constante da otimização do binômio custo x desempenho. Assim funciona a engenharia: buscar cada dia uma solução mais econômica, mais confiável, com melhor desempenho. Desde o advento das

linhas aéreas de transmissão de energia elétrica, a meta sempre foi o aprimoramento, a performance ótima, a satisfação contínua dos consumidores que pagam pelo bem - energia elétrica ininterrupta, sem flutuações, amigável com o meio ambiente. Esta meta foi e continuará sendo necessária e imprescindível cada vez com mais intensidade pelos consumidores no futuro.

Pode-se observar em todas as organizações que estudam os sistemas elétricos de potência que existe uma busca contínua de melhoria, melhor desempenho e menor custos para os três componentes e seus derivados nesta macrotemática. Esta é a tônica básica da visão de futuro aqui exposta, praticamente em um consenso entre nós próprios e os especialistas convidados.

Vê-se, por exemplo, que a crescente dificuldade na obtenção de novas faixas para LTs aéreas e seu elevado custo levam à dupla necessidade de aproveitamento das faixas de linhas existentes e de uso de materiais condutores com menores perdas, além de estruturas mais compactas e de materiais mais leves.

Para tanto, os órgãos estratégicos de planejamento e regulação como MME, EPE, ONS *e* Aneel são importantes por suas diretrizes básicas. Ressalte-se, no entanto, o papel de organizações mundiais, com filiais no Brasil, como a Cigré, por seus fundamentais desenvolvimento e inovações nas áreas de transmissão e a consequente otimização das linhas de transmissão.

7.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Os itens a seguir apresentam o cenário geral desta macrotemática, considerando-se os aspectos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I e indústria e mercado. O esquema resumido deste capítulo encontra-se no Anexo - Planilha de Indicadores.

A Macrotemática Condutores, Isoladores e Estruturas contém elementos que se encontram em contínuo desenvolvimento e, em especial, estão sujeitos a uma busca permanente de melhoria do desempenho elétrico e eletromecânico e da otimização dos custos de instalação, perdas ao longo da vida das LTs e de sua manutenção.

A transmissão em CA continuará sendo importante, atingindo o nível de 1000/1200 kV e apresentando perspectivas favoráveis a seu desenvolvimento. Novas tecnologias para a otimização de condutores,

fundações e desenvolvimento de novas estruturas serão implantadas. Nos setores de construção e manutenção de linhas, ressalte-se a introdução maciça da robótica em serviços de inspeção, de manutenção e até de montagem de componentes e elementos das linhas.

De um modo geral, observa-se que o tema desta macrotemática contém elementos fundamentais tanto no desempenho elétrico e eletromecânico, quanto nos custos das linhas aéreas. Como é muito expressiva a participação das linhas no custo dos sistemas elétricos no exterior e, principalmente, no Brasil, pelas longas distâncias, a busca de alternativas desses componentes tem sido contínua.

Assim sendo, vê-se com otimismo a necessidade de buscar novas tecnologias, desenvolvimento e inovação para esses componentes. Observa-se, também, que, juntos, condutores, isoladores e estruturas constituem praticamente 90% dos custos das linhas. Daí a importância da busca por componentes mais confiáveis e econômicos.

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. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias e as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e SEB potencializam a participação dessas questões no SEB, com impacto positivo sobre o desenvolvimento das rotas tecnológicas.

7.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas

Neste capítulo, são abordadas as métricas de desenvolvimento e as curvas de evolução da maturidade tecnológica das rotas consideradas no projeto. Tais pontos são apresentados, por temática, nos itens subsequentes.

7.3.1. Temática tecnologias envolvendo novos tipos de condutores, isoladores e estruturas

Roadmap tecnológico

Rota - Novos tipos de condutores

A contínua evolução dos condutores de linhas aéreas faz desta rota uma geradora importante de PD&I, desde o primeiro período (2020) até o quarto período (2050). Como não há perspectivas de interrupção do uso de linhas aéreas de transmissão, digamos, nos próximos 50 anos, a tendência é que estudos de novas tecnologias envolvendo condutores prossigam mesmo após 2050. O grau de maturidade da rota pode ser observado no Gráfico 38.

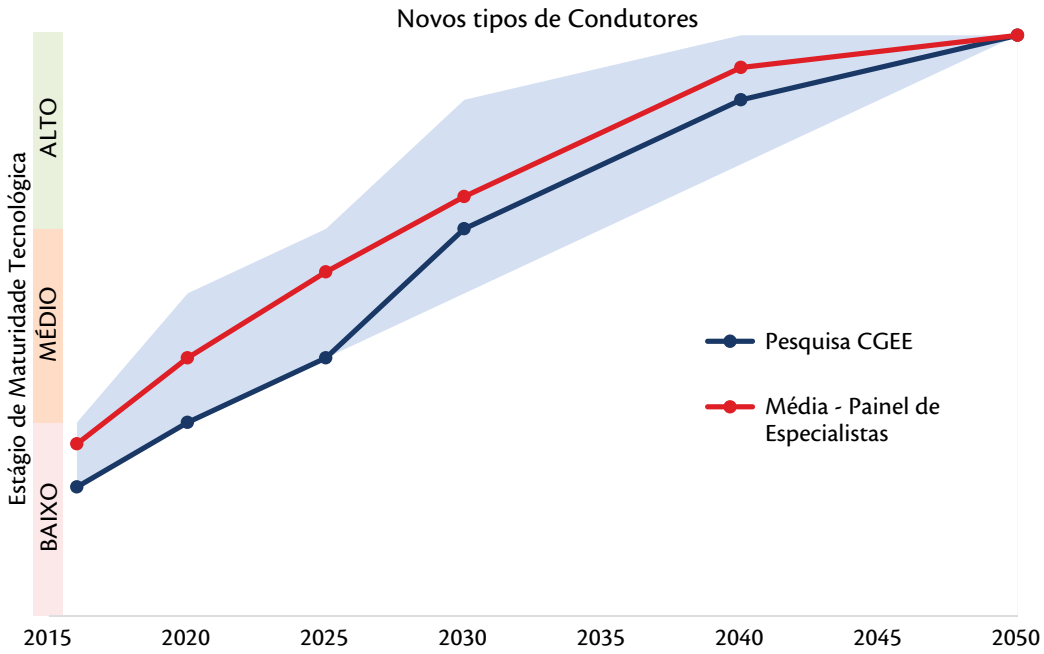

Gráfico 38 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novos Tipos de Condutores

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Novos tipos de Isoladores

Até alguns anos atrás, os isoladores de suspensão em vidro e porcelana eram maioria. Com a introdução dos isoladores em polímero, houve um grande avanço e o desenvolvimento dessa modalidade vem ganhando força no mercado e na criação de novas tecnologias. Com a nanotecnologia, novas camadas de polímero começam a ser desenvolvidas, e isto gera perspectivas significativas de novas PD&I sobre o tópico. Na visão atual, vislumbramos o ano de 2040 como um nítido horizonte para esse conhecimento e suas respectivas tecnologias. A evolução do grau de maturidade da rota pode ser observada no Gráfico 39.

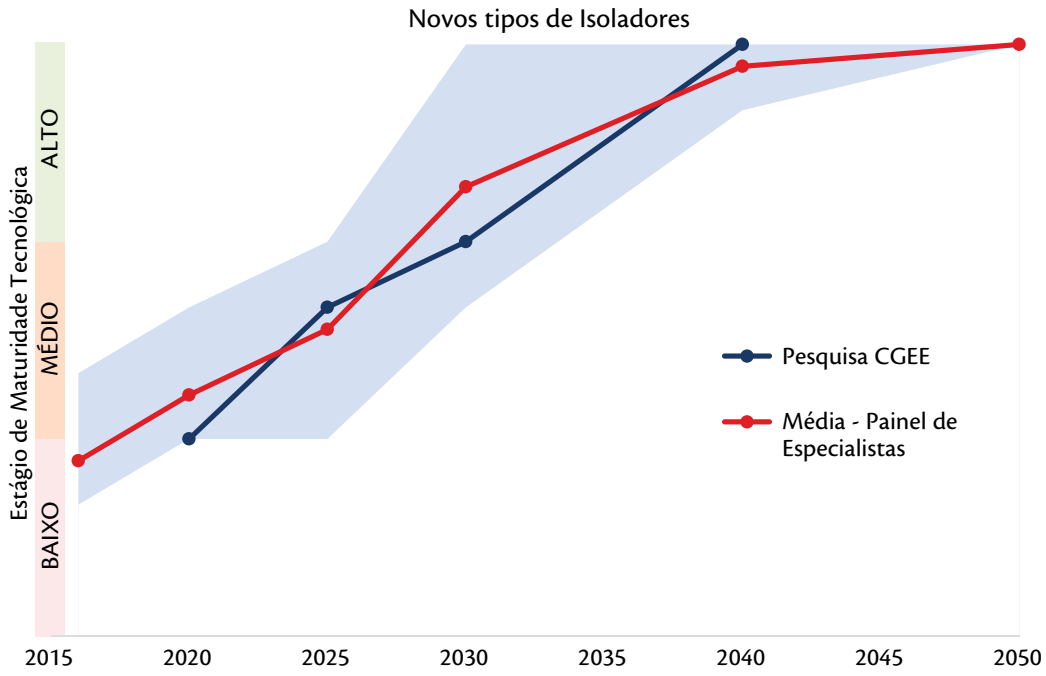

Gráfico 39 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novos Tipos de Isoladores

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na tabela 23.

Tabela 23 - Fatores portadores de futuro para as rotas Tecnológicas Novos Tipos de Condutores e Novos Tipos de Isoladores

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Tecnologias envolvendo novos tipos de Condutores, Isoladores e Estruturas	Novos tipos de condutores	Fatores portadores de futuro	Maiores exigências de regulação ambiental, causando um contínuo aumento de custo das linhas de transmissão, em especial com alternativas novas			Desenvolvimento da engenharia de materiais.	Equipamentos economicamente mais vantajosas para as linhas de transmissão	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Novos tipos de Isoladores	Fatores portadores de futuro	Maiores exigências de regulação ambiental, causando um contínuo aumento de custo das linhas de transmissão, em especial com alternativas novas			Desenvolvimento da engenharia de materiais.	Equipamentos economicamente mais vantajosas para as linhas de transmissão	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Desempenho de Isoladores Poliméricos

A investigação do desempenho de isoladores poliméricos se reveste de especial importância, devido à preocupação com a vida de elementos plásticos. O grau de maturidade tecnológica é representado no Gráfico 40.

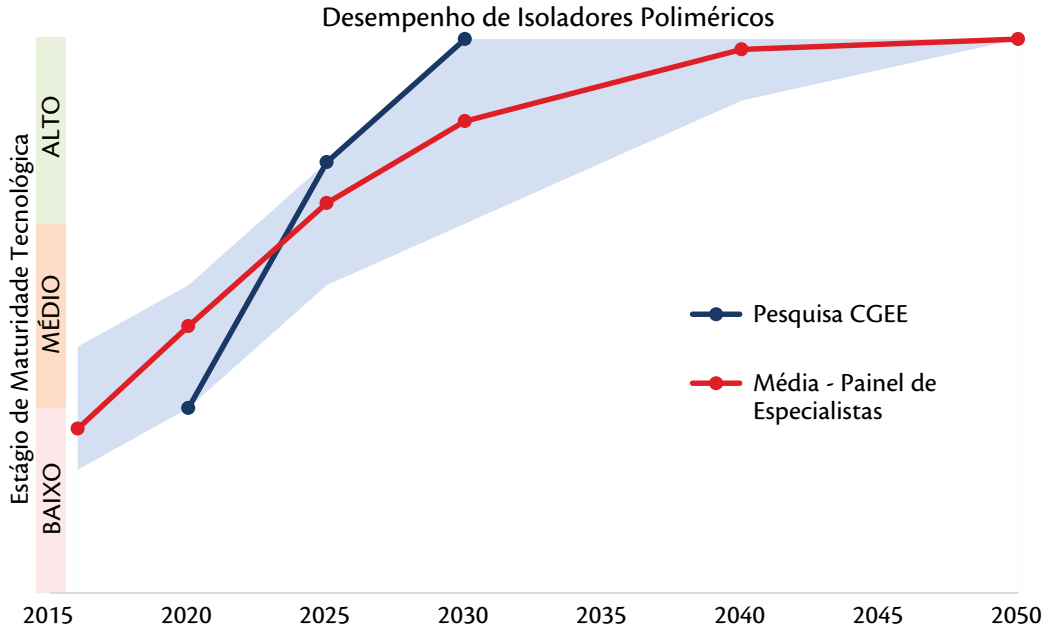

Gráfico 40 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desempenho de Isoladores Poliméricos

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Novos tipos de estruturas

As estruturas ou suportes das linhas aéreas continuarão a apresentar um crescimento ininterrupto, buscando a redução do peso e do custo, além da melhoria do impacto ambiental. A evolução tecnológica desta rota é apresentada no Gráfico 41.

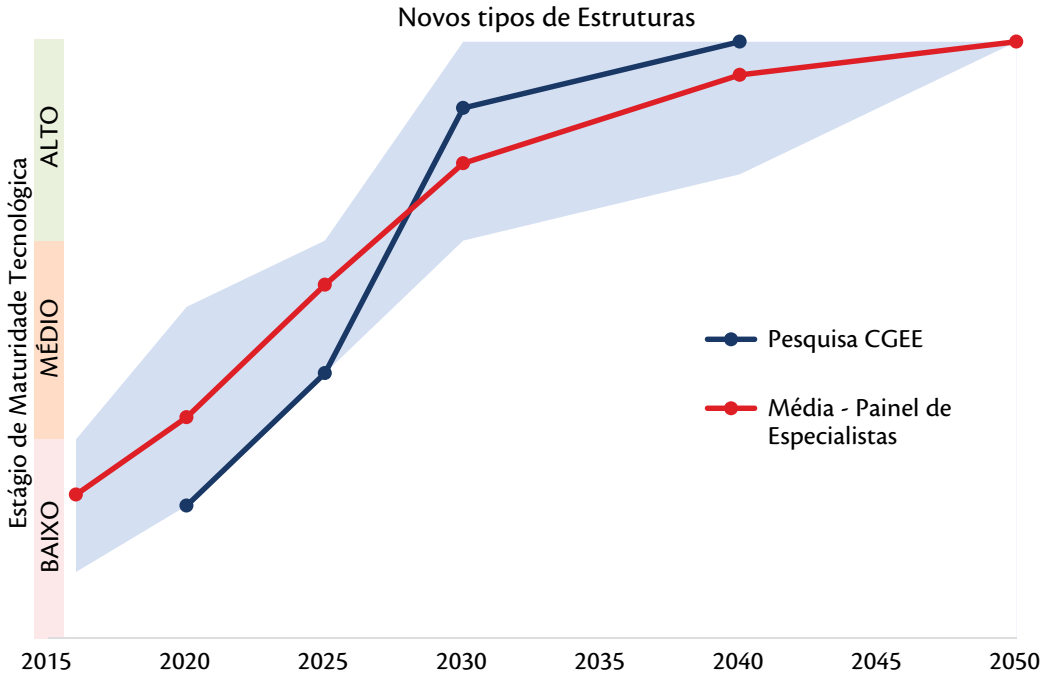

Gráfico 41 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novos Tipos de Estruturas

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 portares de futuro da evolução das rotas Desempenho de Isoladores Poliméricos e Novos Tipos de Estruturas

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Tecnologias envolvendo novos tipos de Condutores, Isoladores e Estruturas	Desempenho de Isoladores Poliméricos	Fatores portadores de futuro	Maiores exigências de regulação ambiental, causando um contínuo aumento de custo das linhas de transmissão, em especial com alternativas novas			Medir e controlar desempenho dos isoladores poliméricos	Metodologias e técnicas de análise de resultados Equipamentos economicamente mais vantajosas para as linhas de transmissão	
		Maturidade	BAIXO		ALTO			
	Novos tipos de estruturas	Fatores portadores de futuro	Maiores exigências de regulação ambiental, causando um contínuo aumento de custo das linhas de transmissão, em especial com alternativas novas			Verificação do índice de falhas, em testes laboratoriais.	Equipamentos economicamente mais vantajosas para as linhas de transmissão	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

7.3.2. Temática novas tecnologias envolvendo projetos de linhas e componentes

Na Temática 2, em suas três rotas, a métrica básica que as caracteriza é uma maior consideração dos fenômenos reais dos carregamentos elétricos e mecânicos, que são característicos às novas tecnologias buscadas nas três rotas. De uma maneira mais simplista, é possível dizer que essa métrica se caracterizaria pela busca de carregamentos realistas para as linhas. Pode-se ver que uma tecnologia de projeto elétrico ou mecânico realista se aplica.

Roadmap tecnológico

Rota - Otimização de projeto de fundações

Esta otimização vem sendo buscada há anos e prosseguirá até o horizonte proposto, conforme evolução representada no Gráfico 42.

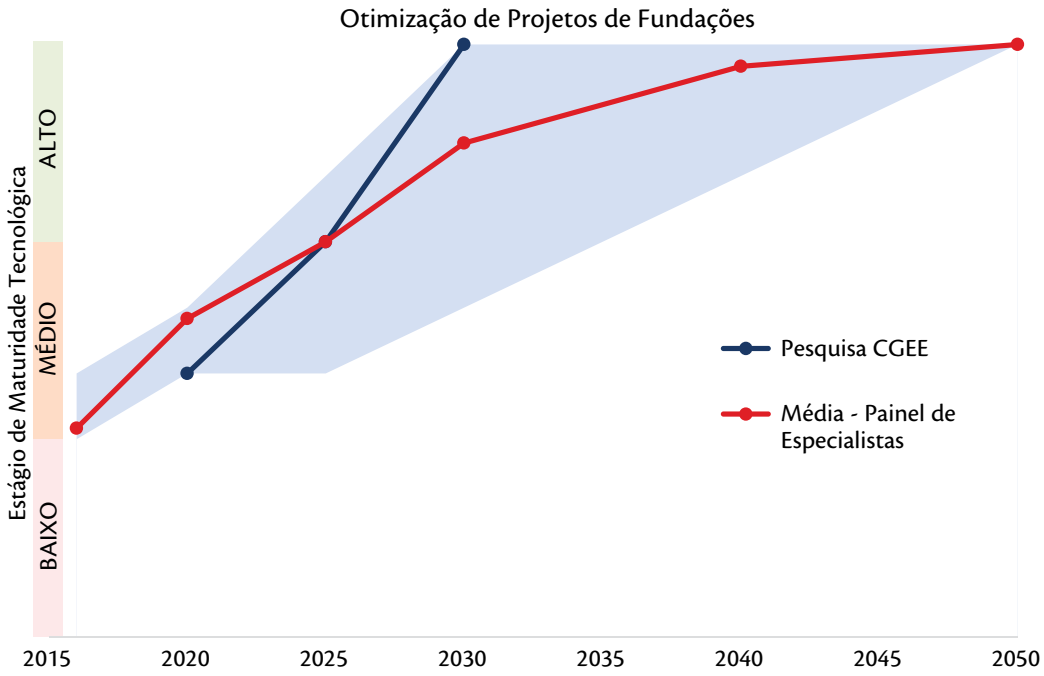

Gráfico 42 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Otimização de Projetos de Fundações

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Otimização de projetos de linhas aéreas, incluindo a avaliação de linhas existentes

A otimização de linhas, considerando-se a influência de linhas existentes, é um conhecimento maduro, sendo necessário um período mais curto para se alcançar o nível esperado de maturidade (ver Gráfico 43).

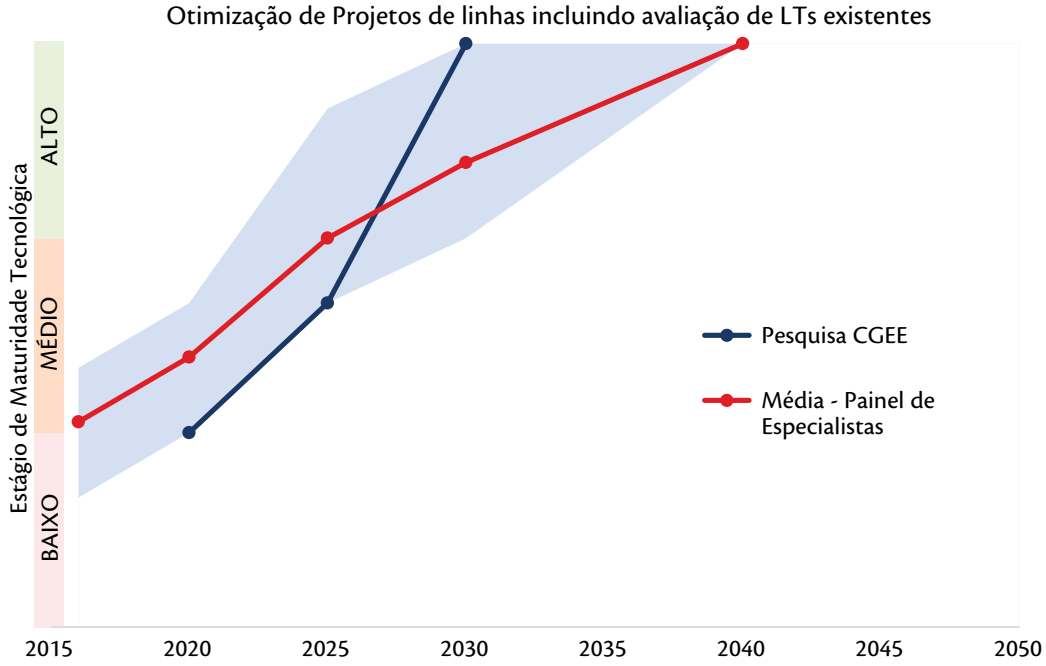

Gráfico 43 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Otimização de Projetos de Linhas Incluindo Avaliação de LTs Existentes

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Carregamentos mecânicos em linhas de transmissão

O estudo e a aplicação de novos carregamentos mecânicos em LTs, em especial os carregamentos dinâmicos, vêm sendo há anos discutidos, mas a sua maturidade, em termos práticos, está mais para média (M) que para alta (A), conforme demonstrado no Gráfico 44.

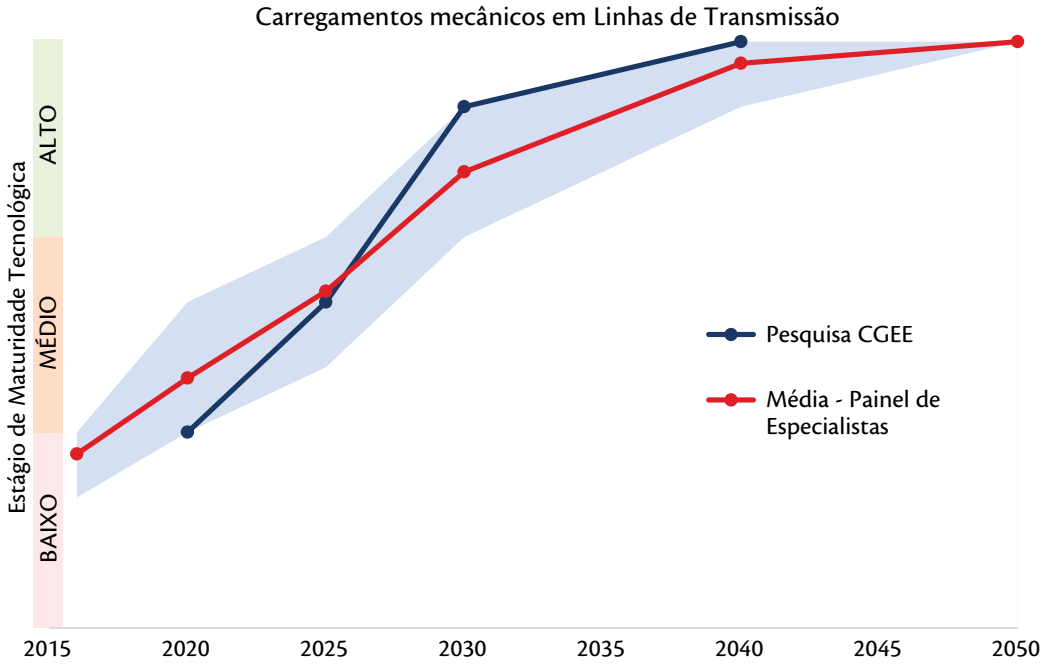

Gráfico 44 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Carregamentos Mecânicos em Linhas de Transmissão

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 Otimização de Projeto de Fundações, Otimização de Projetos de Linhas Aéreas Incluindo Avaliação de Linhas Existentes e Carregamentos Mecânicos em Linhas de Transmissão

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Novas Tecnologias Envolvendo Projetos de Linhas e Componentes	Otimização de projeto de fundações	Fatores portadores de futuro	Incentivo à produção científica em âmbito nacional Dificuldades de se formarem redes colaborativas nas pesquisas de novas tecnologias		Incentivos governamentais e privados ao desenvolvimento de novas tecnologias Demanda nacional	Busca de utilização de fenômenos reais de carregamento elétrico e mecânico das linhas de transmissão Redução dos impactos no solo e de acidentes nas linhas aéreas		
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
	Otimização de Projetos de Linhas Aéreas Incluindo Avaliação de Linhas Existentes	Fatores portadores de futuro	Incentivo à produção científica em âmbito nacional Dificuldades de se formarem redes colaborativas nas pesquisas de novas tecnologias		Incentivos governamentais e privados ao desenvolvimento de novas tecnologias Demanda nacional	Busca de utilização de fenômenos reais de carregamento elétrico e mecânico das linhas de transmissão Redução dos impactos no solo e de acidentes nas linhas aéreas		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		
	Carregamentos Mecânicos em Linhas de Transmissão	Fatores portadores de futuro	Incentivo à produção científica em âmbito nacional Dificuldades de se formarem redes colaborativas nas pesquisas de novas tecnologias		Incentivos governamentais e privados ao desenvolvimento de novas tecnologias Demanda nacional	Busca de utilização de fenômenos reais de carregamento elétrico e mecânico das linhas de transmissão Redução dos impactos no solo e de acidentes nas linhas aéreas		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

7.3.3. Temática novas tecnologias para montagem e manutenção de linhas de transmissão

Roadmap tecnológico

Rota - Novas tecnologias para montagem e manutenção de linhas de transmissão

Novos métodos construtivos e de manutenção compreendem, por exemplo, o uso da robótica e o emprego generalizado de helicópteros, sendo necessárias duas ou mais PD&I, e se prolongando previsivelmente até 2035. A métrica básica que caracteriza a rota é a evolução de métodos construtivos e de manutenção. De uma maneira mais simplista, pode-se dizer que essa métrica se caracterizaria pela busca de melhores, mais eficientes e seguros métodos de construção ou de manutenção. O Gráfico 45 demonstra a evolução do grau de maturidade da rota.

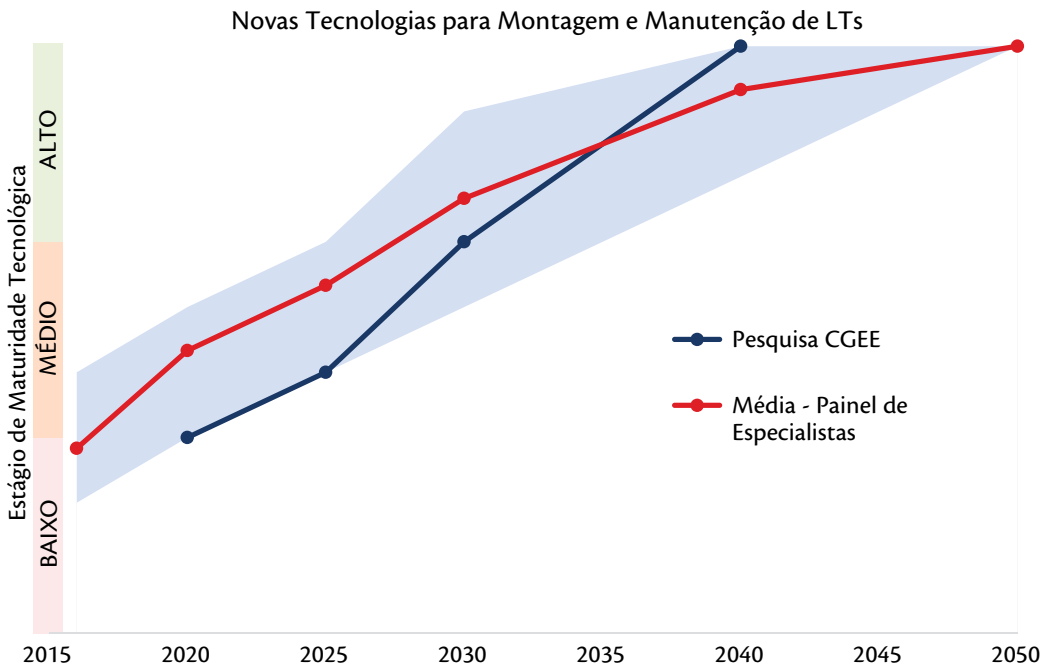

Gráfico 45 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias para Montagem e Manutenção de LTs

Fonte: Elaboração própria.

Determinação da vida remanescente de linhas de transmissão

A determinação da vida remanescente de linhas aéreas e extensão de vida exige várias tecnologias novas, algumas já existentes, mas é atividade complexa. É fundamental para o planejamento de novas LTs ou para o reaproveitamento daquelas já existentes. A métrica básica que a caracteriza é a **evolução de métodos construtivos, de manutenção e investigativos sobre o estado de componentes** da linha. De uma maneira mais simplista, é possível dizer que esta métrica se caracterizaria pela busca de métodos de avaliação do estado de conservação ou de deterioração dos componentes, de forma a ser possível avaliar a sua durabilidade adicional ou em que extensão se deve atuar para prolongar a vida de uma LT. Lembre-se que a linha de transmissão, neste caso, se encontra sob a responsabilidade dos setores de manutenção, aos quais cabe investigar ou, pelo menos, coordenar os trabalhos investigativos sobre as condições em que se encontram elementos da LT como peças metálicas enterradas, parafusos, ferragens etc. Daí em frente se iniciam os trabalhos investigativos sobre **Vida Remanescente da LT** ou sobre a **Extensão de Vida da LT**. A evolução do grau de maturidade tecnológico da rota é representado no Gráfico 46.

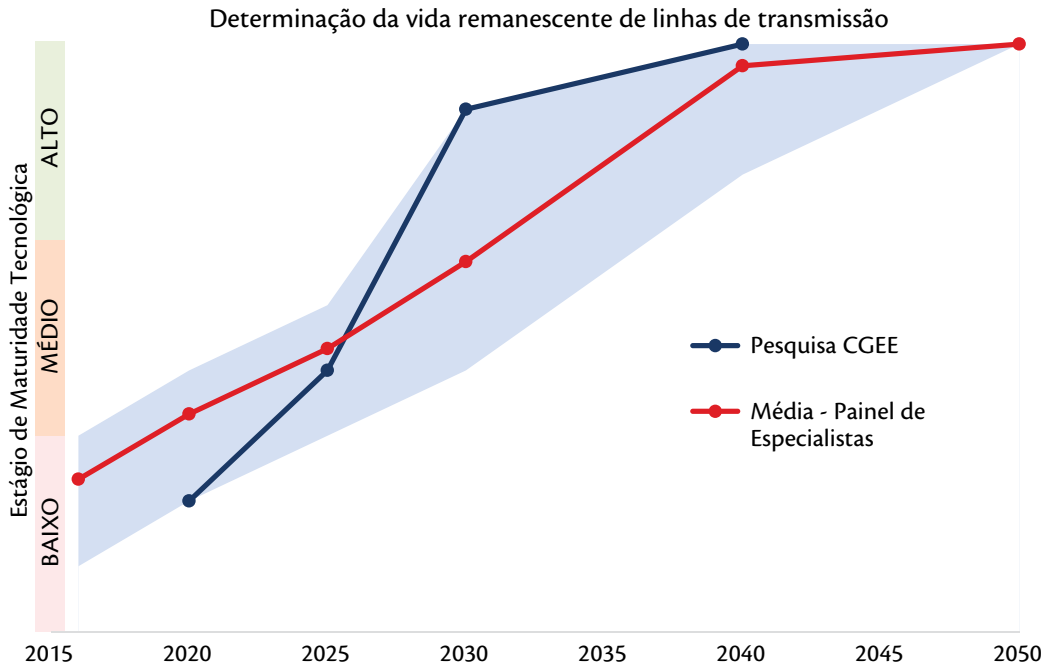

Gráfico 46 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Determinação da Vida Remanescente de Linhas de Transmissão

Fonte: Elaboração própria.

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

Tabela 26 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Tecnologias para Montagem e Manutenção de Linhas de Transmissão e Determinação da Vida Remanescente de Linhas de Transmissão

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Novas tecnologias para montagem e manutenção de linhas de transmissão	Novas tecnologias para montagem e manutenção de linhas de transmissão	Fatores portadores de futuro	Demanda incerta no mercado nacional Aumento da produção científica em âmbito nacional.		Introdução da robótica como ferramenta de montagem e manutenção mais segura para monadores e tendendo a ser mais econômica à medida que a tecnologia evolui;			
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Determinação da vida remanescente de linhas de transmissão	Fatores portadores de futuro	Demanda incerta no mercado nacional Aumento da produção científica em âmbito nacional.		Dificuldades do mercado nacional em desenvolver equipamentos especiais			
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

7.3.4. Temática desempenho elétrico e ambiental

Nesta temática, a métrica básica que a caracteriza é a melhoria do **desempenho** da linha. De uma maneira mais simplista, se poderia dizer que a métrica se caracteriza pela busca de mitigação do impacto ambiental da LT, de forma a aumentar a sua aceitação pelas comunidades afetadas, além da busca por um melhor desempenho elétrico da LT, que depende muito de seu aterramento para a frequência industrial (60 Hz) e também para surtos ou descargas atmosféricas.

Roadmap tecnológico

Rota - Mitigação do impacto ambiental

Compreende, por exemplo, o estudo dos efeitos elétricos das LTs no meio ambiente, seus impactos visuais e os impactos de construção e de manutenção na vegetação e nas moradias. A representação gráfica da evolução tecnológica é apresentada no Gráfico 47.

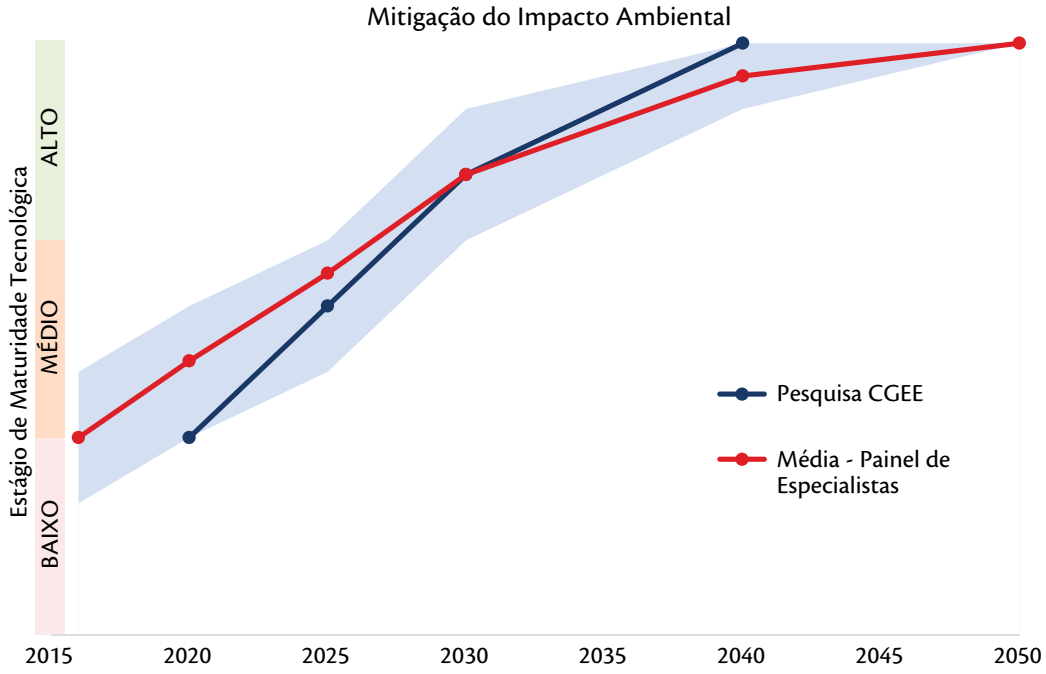

Gráfico 47 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Mitigação do Impacto Ambiental

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Aterramento para as estruturas de transmissão

Constitui um importante fator que afeta o desempenho e a continuidade de serviço das LTs, além da segurança de pedestres e operadores. O assunto vem sendo motivo de preocupação há décadas e nunca houve avanços na busca de soluções definitivas, por exemplo, para o aterramento impulsivo. É muito em função da atividade de descargas atmosféricas, sendo de pouca importância

na Europa, onde os níveis ceráunicos são reduzidos. Aparelhos de medição com precisão aceitável para impedâncias de surto precisam ser desenvolvidos e devem apresentar confiabilidade adequada. A evolução tecnológica dessa rota é representada no Gráfico 48.

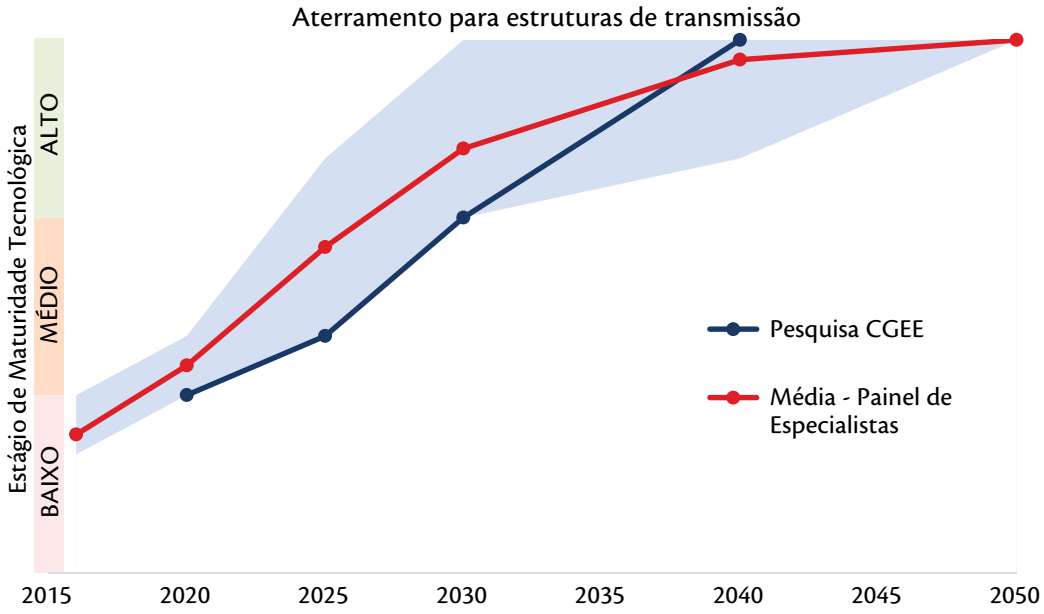

Gráfico 48 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Aterramento para Estruturas de Transmissão

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 27

Tabela 27 - Fatores portadores de futuro das rotas Mitigação do Impacto Ambiental e Aterramento para Estruturas de Transmissão

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Desempenho elétrico e ambiental	Mitigação do impacto ambiental	Fatores portadores de futuro	Maiores custos das linhas de transmissão ao se introduzir o fator ambiental		Incentivo dos órgãos ambientais à diminuição dos impactos visuais, elétricos e de agressão do solo pelas empresas construtoras Introdução de medições de terra mais precisas, há muito desejadas pelo mercado			
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		
	Aterramento para estruturas de transmissão	Fatores portadores de futuro	Mais exigências da legislação em relação aos potenciais elétricos de toque e de passo		Mais incentivos à melhoria do desempenho das linhas, diminuindo os desligamentos e os eventuais blecautes			
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

7.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), 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 28.

Tabela 28 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Estruturas, Condutores e Isoladores

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Novos tipos de condutores	Tecnologias envolvendo novos tipos de Condutores, Isoladores e Estruturas
2	Otimização de projetos de linhas aéreas, incluindo a avaliação de linhas existentes	Tecnologias envolvendo projetos de linhas e componentes
3	Mitigação do impacto ambiental	Desempenho elétrico e ambiental
4	Novos tipos de estruturas	Tecnologias envolvendo novos tipos de Condutores, Isoladores e Estruturas
5	Novas tecnologias para montagem e manutenção de linhas de transmissão	Novas tecnologias de manutenção e montagem de linhas de transmissão
6	Determinação da vida remanescente de linhas de transmissão e extensão de vida	Novas tecnologias de manutenção e montagem de linhas de transmissão
7	Carregamentos mecânicos em linhas de transmissão	Tecnologias envolvendo projetos de linhas e componentes
8	Aterramento para torres de transmissão	Desempenho elétrico e ambiental
9	Otimização de projeto de fundações	Tecnologias envolvendo projetos de linhas e componentes
10	Novos tipos de isoladores	Tecnologias envolvendo novos tipos de Condutores, Isoladores e Estruturas
11	Desempenho de isoladores poliméricos	Tecnologias envolvendo novos tipos de Condutores, Isoladores e Estruturas

Fonte: Elaboração própria.

A escolha das rotas tecnológicas prioritárias foi feita em função da importância do tema, de sua avaliação pela comunidade técnica internacional (Cigré, IEEE, Comissão Eletrotécnica Internacional - IEC etc.) e das perspectivas de uso das tecnologias envolvidas.

Os pontos básicos que nortearam a escolha das prioridades de rotas foram:

- Importância da rota para os sistemas elétricos, principalmente se considerados o desempenho das LTs e em que extensão elas afetam os clientes ou os consumidores. Ressalte-se aqui a importância da continuidade das LTs em serviços básicos como hospitais, indústrias que necessitam de serviços contínuos de suprimento etc.
- Redução de custos que as rotas escolhidas poderão proporcionar a curto ou médio prazos, com isso facultando redução ou, pelo menos, menores tarifas de energia elétrica.

Capítulo 8

Capítulo 8

Macrotemática Equipamentos de Alta Tensão e Subestações

A elaboração das proposições de estudo a serem desenvolvidas no âmbito dos equipamentos e projetos de subestação teve como base a literatura técnica disponível no IEEE, Cigré, universidades e centros de pesquisa. A distribuição das tarefas em curto, médio e longo prazos teve como base as exigências do setor elétrico, a maturidade da tecnologia e o volume de trabalho necessário, considerando-se o corpo técnico disponível atualmente nas concessionárias, nas universidades e centros de pesquisa e a pouca disponibilidade de laboratórios de ensaio. A avaliação de equipamentos para alta tensão abrange um volume de equipamentos e tecnologias que demandariam uma quantidade de tempo muito grande para serem abordados com a precisão necessária. Assim sendo, face ao tempo disponível, nesta macrotemática foram associados os temas que, na visão dos participantes do estudo, teriam a capacidade de apresentar resultados satisfatórios no seu desenvolvimento, solucionar problemas que apareceram durante a operação, implantar novas tecnologias que agregariam conhecimento e melhorariam o desempenho dos equipamentos e dissolver os gargalos de tecnologia que apareceram com a ampliação do setor de energia elétrica brasileiro e a entrada da UAT tanto nas linhas de transmissão, quanto nas subestações.

8.1. Visão de futuro

8.1.1. Cenário setorial

O cenário nacional para a transmissão de energia elétrica indica que a corrente contínua permanece como uma tendência para a transmissão de grandes blocos de energia a longas distâncias. Este fato vai implicar principalmente o desenvolvimento de projetos de subestações, com ênfase na compactação, devido ao custo cada vez mais elevado do terreno, em equipamentos otimizados com

maior confiabilidade e durabilidade, em novos parâmetros para manutenção, principalmente em linha viva, e nos estudos sobre poluição, que é mais crítica em corrente contínua.

Como não existe restrição para o uso de alternativas tecnológicas, desde que devidamente analisadas e testadas, para a ampliação, a modernização e/ou a repotenciação da malha de transmissão existente, notoriamente envelhecida, abre-se um leque enorme de alternativas, como o uso de nanotecnologia no desenvolvimento de novos produtos para refrigeração, proteção e isolamento de equipamentos e materiais supercondutores para cabos e limitadores de corrente de curto-circuito. Estas tecnologias devem ser estudadas e acompanhadas visando à sua implantação a curto, médio e longo prazos, dependendo do custo e tempo necessários para seu desenvolvimento e implantação.

Além disso, o custo da transmissão cada vez mais elevado, em função das questões fundiárias e socioambientais, tem feito aumentar as perspectivas de utilização de transmissão subterrânea com uso localizado, abrindo um mercado ainda pouco explorado para o setor de materiais e equipamentos.

As mudanças climáticas que estão ocorrendo estão forçando a necessidade de estudos sobre seu impacto no sistema elétrico e as adaptações necessárias para atender às novas condições de vento, chuva e poluição. Um dos principais problemas atuais é o custo elevado da manutenção. Alguns agentes, tanto ambientais quanto provocados pelo desenvolvimento humano, são um dos principais responsáveis por este custo elevado, pois usualmente não são considerados no projeto e, para resolver os problemas que provocam, como a interrupção no fornecimento de energia, são utilizadas soluções bastante onerosas.

O custo elevado da mão de obra e a dificuldade de obtenção e de treinamento de profissionais para a operação de subestações têm aumentado as tendências de uso de equipamentos como os PMUs e os sensores para monitoramento de equipamentos, que facilitam a operação remota, o diagnóstico e a manutenção das subestações.

O problema principal para alavancar as evoluções necessárias apresentadas anteriormente na avaliação do cenário setorial de transmissão é que a situação do País está crítica quando se observa a estrutura de laboratórios capazes de realizar PD&I na área de Equipamentos Elétricos e Subestações.

O País não dispõe de laboratórios suficientes para promover a alavancagem das rotas tecnológicas apresentadas. Os laboratórios são poucos, não são devidamente equipados e são geograficamente mal localizados. Os mais bem equipados possuem filas de espera que inviabilizam os cronogramas dos projetos. Há a necessidade de mais investimentos em laboratórios especializados para atender a esta macrotemática, sob a pena de ficarmos completamente dependentes de cooperações internacionais.

O setor de normalização está abandonado. Poucas concessionárias participam da elaboração das normas técnicas que elas mesmas usarão. Cabe lembrar que um dos parâmetros usados para avaliar o crescimento de um País é a quantidade de normas técnicas elaboradas.

A capacitação de pessoal nos temas também deveria ser prioridade, pois os profissionais mais competentes estão em final de carreira ou já se aposentaram e estão trabalhando como consultores independentes. Simplesmente há poucos profissionais jovens para os quais o conhecimento venha a ser transmitido. É preciso estimular as novas gerações de engenheiros a militarem no tema e capacitá-los. É necessário estimular os profissionais mais competentes, em final de carreira, a transmitir seu conhecimento para os profissionais mais jovens.

É importante que esses profissionais mais jovens, que tenham interesse em estudos e pesquisa, tenham uma evolução de carreira diferenciada, pois o modelo atualmente existente privilegia a operação e não o ganho de conhecimento.

As deficiências existentes hoje são tão básicas que não há como falar em "liderança mundial" ou "referência continental". As ações céleres a serem tomadas servem apenas para garantir ao País a soberania tecnológica na macrotemática em foco.

Se forem desconsiderados os impactos de barreiras burocráticas, em 10 anos, pelo menos, pode-se alcançar objetivos significativos no País. Caso as medidas sejam tomadas em parcerias público-privadas, talvez em um horizonte um pouco mais próximo.

Ou seja, é importante perceber que a indisponibilidade de infraestrutura para ensaios e testes e o não estímulo aos novos profissionais no ganho de conhecimento implicam, diretamente, o não atendimento de praticamente todas as rotas tecnológicas na Macrotemática Equipamentos de Alta Tensão e Subestações.

8.1.2. Objetivo geral

O objetivo geral para esta macrotemática consiste em realizar estudos de PD&I visando à modernização ou a recapacitação do sistema elétrico, em face de seu envelhecimento, o que depende do tipo de equipamento ou do projeto, além da disponibilização de novas tecnologias existentes e vindouras para agilizar a tomada de decisões visando à expansão das subestações existentes, a instalação de novas subestações, a sua operação e manutenção. Alguns pontos que permearam praticamente todas as rotas avaliadas são a transmissão em UAT, tanto em corrente alternada quanto em corrente contínua, a

disponibilidade de laboratórios de ensaio, o emprego da nanotecnologia e o incentivo à normalização. A modernização ou a recapacitação das subestações, em face de seu envelhecimento, deverão crescer em importância ao longo de todo o horizonte, demandando um volume considerável de recursos.

8.1.3. Objetivo específico

Para suportar o objetivo geral, as tecnologias devem ser estudadas e acompanhadas visando à sua implantação a curto, médio e longo prazos.

Curto prazo (2017-2020):

Em curto prazo, ou seja, de 2017 a 2020, o objetivo a ser alcançado com o desenvolvimento dos estudos de P&D é:

- Desenvolvimento de nanomateriais;
- Desenvolvimento de nanofluidos;
- Compactação de subestações;
- Dimensionamento para poluição e chuvas intensas.

Médio prazo (2020-2030):

Em médio prazo, ou seja, de 2020 a 2030, será necessário o desenvolvimento de PD&I a fim de permitir uma evolução para atingir os seguintes objetivos:

- Desenvolvimento de projetos pilotos com nanomateriais;
- Desenvolvimento de projetos pilotos com nanofluidos;
- Aplicação de técnicas de manutenção em UAT.

Longo prazo (2030-2050):

Em longo prazo, ou seja, entre 2030 e 2050, os objetivos específicos são:

- Aplicação de nanomateriais em equipamentos;
- Aplicação de nanofluidos em equipamentos;
- Aplicação de ligas metálicas nanocristalinas e amorfas.

8.1.4. Fundamentação

Para construir um mapa dos avanços tecnológicos necessários para alavancar o crescimento do setor elétrico, algumas condicionantes têm de ser identificadas e avaliadas, permitindo uma melhor distribuição dos recursos ao longo do horizonte do projeto (2020, 2025, 2030, 2040 e 2050).

Nesse caso, inicialmente devem ser avaliadas as premissas macroeconômicas para o horizonte do projeto:

- Segundo estudos da EPE e do MME, a taxa do PIB será crescente até meados de 2030, quando se estabilizará e iniciará um pequeno declínio. A projeção é de um crescimento médio em torno de 2, 5% a.a. no período de 2017 a 2026.
- O PIB será crescente e modulado, significando então que crescerá menos no final do período.
- Segundo o MME, diferentes setores crescem a taxas distintas, havendo uma correspondência entre o grau de desenvolvimento da economia e a distribuição setorial.
- Até 2050, o setor de serviço ganhará participação, mantendo a sua posição de destaque frente aos demais macrossetores. No entanto, nos anos iniciais a indústria crescerá mais, em função da recuperação da utilização da capacidade ociosa e do desempenho do setor extrativo.
- De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população brasileira, no horizonte até 2050, crescerá a um ritmo cada vez menor e começará a declinar a partir da década de 2040.
- Segundo o IBGE, o grande crescimento demográfico da população economicamente ativa ocorrerá entre 2025 e 2035, ou seja, há um excedente de pessoas economicamente ativas.
- Segundo a EPE, haverá um maior crescimento de serviços; portanto, uma redução gradativa da participação da indústria no PIB. Na última década, considera-se que haverá uma aceleração da penetração de segmentos que gerem maior valor agregado e menos intensivo em energia.

Face ao apresentado, existe uma forte necessidade de estudos para o planejamento sobre o impacto das mudanças climáticas e as adaptações necessárias do sistema elétrico a essas novas condições ambientais, considerando-se os efeitos dos impactos socioambientais na oferta de geração e transmissão de energia elétrica, influenciando no planejamento e na expansão de novas subestações.

8.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática 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 de tempo até 2050 (ver Anexo).

Pode-se observar que o cenário geral deste estudo se concentra basicamente na necessidade de compactação das subestações, tanto das novas quanto nas ampliações das existentes, devido ao elevado custo atual dos terrenos. Para que uma redução nas dimensões gerais de 10% até 2020, 15% até 2025 e 20% até 2030 seja possível, há a necessidade de compactar todos os equipamentos existentes. A compactação dos equipamentos se fundamenta principalmente nos desenvolvimentos da nanotecnologia, abrangendo nanofluidos, revestimentos termo e eletrocrômicos e ligas metálicas nanocristalinas.

O custo elevado dessas novas tecnologias fazem com que os estudos para a sua implantação sejam realizados fora do Brasil pela maior parte dos fabricantes. Mas pode-se exigir:

- Até 2020, um aumento em 5% no portfólio de componentes fabricados no Brasil em comparação a 2016;
- Até 2025, um aumento em 10% no portfólio de componentes fabricados no Brasil em comparação a 2020;
- Até 2030, um aumento em 10% no portfólio de componentes fabricados no Brasil em comparação a 2025;
- Até 2050, um aumento em 20% no portfólio de componentes fabricados no Brasil em comparação a 2030.

As exigências acima fortaleceriam o parque tecnológico brasileiro e dariam uma sinalização positiva ao setor industrial.

Há a necessidade de reduzir as barreiras entre as concessionárias para que haja um maior favorecimento para a disponibilidade, para todo o setor elétrico, das soluções implantadas para resolver seus próprios problemas, considerando-se os direitos de patente de cada uma. Para que isso ocorra, há a necessidade também de uma maior participação das concessionárias em seminários, tanto nacionais quanto fora do País, e o crescimento tecnológico do corpo técnico das concessionárias.

Outro problema apontado pelo cenário geral é o envelhecimento atual dos equipamentos do setor elétrico. A substituição pura e simples pode não ser possível devido ao elevado custo e às características dimensionais dos novos equipamentos. Assim sendo, há a necessidade urgente de um levantamento até 2020 da real situação dos equipamentos, abrangendo as novas tecnologias para o levantamento da vida útil residual, para que até 2025 seja elaborado um planejamento para a substituição que deve ser encerrada em 2030.

Os estudos realizados pela China e pela Índia em UAT, abrangendo sistemas até 1200 kV, em corrente alternada, e 1000 kV, em corrente contínua, abrem um enorme leque de possibilidades para o planejamento. Atualmente, os estudos em UAT, principalmente em corrente contínua, são realizados fora do Brasil com a participação de um número muito pequeno de engenheiros brasileiros cedidos pelas concessionárias, mas que não conseguem ter acesso a toda a dinâmica do projeto. Há a necessidade de serem realizados os estudos para a implantação dessas tecnologias no Brasil. Mas para que isto seja possível, é preciso ter laboratórios com capacidade de realizar os ensaios necessários e um corpo técnico com capacidade de operá-los. Assim sendo, até 2020, devem ser realizados os estudos para a implantação desse laboratório, que deverá estar finalizado e operando até 2025. Além disso, é importante realizar, imediatamente, um fórum com todos os laboratórios e centros de pesquisa existentes no Brasil para se ter uma ideia da real capacidade de cada um, tanto em tecnologia e equipamentos quanto em mão de obra, para evitar a superposição de estudos e a disputa acirrada por verbas de P&D. Este fórum permitirá saber, com a profundidade necessária, a real situação do parque tecnológico brasileiro e o volume de recursos necessários para torná-lo capacitado em atender o setor elétrico. Os resultados permitirão que, até 2020, se tenha uma distribuição da capacidade operacional da pesquisa no Brasil, permitindo atender a todo o nosso território.

Outro aspecto a ser considerado é a normalização. Um dos parâmetros considerados no desenvolvimento de um País é o número de normas técnicas emitidas, pois uma norma técnica regula o setor e orienta os possíveis fabricantes quanto às solicitações usuais que seus produtos terão de garantir. A ausência de uma norma técnica faz com que cada comprador se sinta no direito de elaborar a sua especificação,

criando uma multiplicidade de solicitações, algumas ainda em desenvolvimento, que encarecem o custo final do produto e fazem com que o fabricante pense duas vezes antes de investir em um novo produto ou em uma nova tecnologia.

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. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias e as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e SEB potencializam a melhoria ou a participação dessas questões no SEB, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

8.3. Estudo de prospecção das rotas tecnológicas

Neste capítulo, são abordados os *Roadmap*s tecnológicos das rotas consideradas neste projeto, que dizem respeito à evolução tecnológica das rotas, associadas aos fatores portadores de futuro do desenvolvimento das respectivas tecnologias.

Conforme informado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), os gráficos de evolução da maturidade tecnológica da rota tecnológica caracterizam-se pela percepção do consultor da macrotemática e pela percepção de vários especialistas sobre o desenvolvimento das tecnologias mais importantes relacionadas a cada rota.

8.3.1. Temática subestação de alta tensão

Roadmap tecnológico

As rotas tecnológicas e as linhas de pesquisas são apresentadas as seguir:

Rota - Subestações Isoladas a Ar (SIA)

Um dos principais problemas a serem observados na implantação de subestações para o desenvolvimento de Sistema Elétrico Brasileiro é a pouca disponibilidade de espaço livre, assim como o aumento do custo

do metro quadrado, dentro dos grandes centros brasileiros, seja para implantar uma nova subestação, seja para ampliar uma já existente. Assim sendo, a compactação se torna a palavra-chave para as subestações ao ar livre em curto prazo, mas essa compactação vai atingir um limite imposto pela física e pela dimensão dos equipamentos presentes na subestação, e em longo prazo provavelmente novas subestações ao ar livre deverão ser substituídas por subestações híbridas ou isoladas a gás. Ao exposto, deve-se acrescentar a avaliação de soluções para a mitigação de ruídos, do corona e da radiointerferência; o desenvolvimento de metodologias que permitam quantificar e comparar a confiabilidade entre diferentes tipos e arranjos de subestações ao ar livre; o desenvolvimento de equipamentos e interfaces inteligentes e interconectados via rede local; e, principalmente, a avaliação do envelhecimento dos equipamentos da SE e o estabelecimento dos procedimentos para a substituição como estudos a serem desenvolvidos em curto prazo. Em médio prazo, deve-se considerar a avaliação do isolamento para UAT com base em estudos de surtos de manobra e procedimentos para lavagem e manutenção em subestações para UAT energizadas; e, em longo prazo, se destacam os estudos de compatibilidade eletromagnética em subestações de UAT e a criação de um banco de dados com as soluções empregadas para os problemas que aparecerem e a sua disponibilização para todas as empresas do Sistema Elétrico Brasileiro. A evolução da maturidade tecnológica pode ser observada no gráfico a seguir.

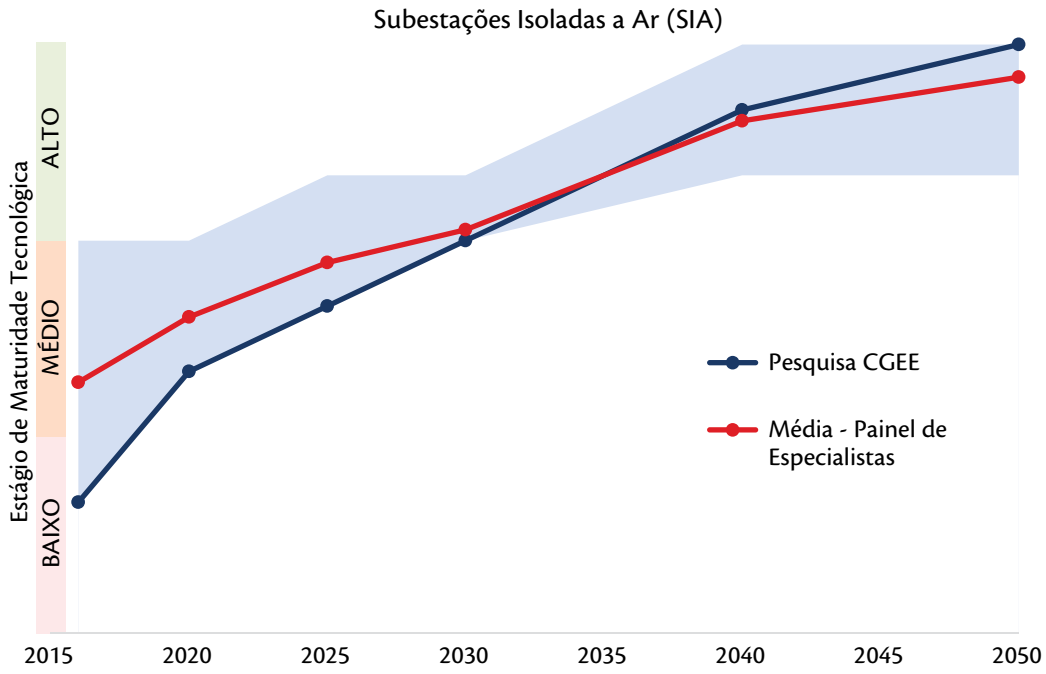

Gráfico 49 - Evolução da maturidade tecnológica da rota SAI

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Subestações Isoladas a Gás (SIG)

Nas subestações isoladas a SF-6, todos os componentes são colocados em um invólucro metálico aterrado e, em seguida, todo o sistema é alojado em uma câmara cheia de gás. Subestações de isolados a gás (GIS) utilizam principalmente gás hexafluoreto de enxofre (SF6) como isolante primário. Ele é não tóxico, mantém as propriedades atômicas e moleculares, mesmo em altas tensões, possui elevadas propriedades de resfriamento e de extinção de arco. Com a inclusão do SF-6, pelo protocolo de Kioto, entre os gases responsáveis pelo efeito estufa (23.900 vezes mais potente que o CO_2) e seu longo tempo de permanência na atmosfera sem se degradar (aproximadamente 3200 anos), os estudos com combinações entre SF-6 e outros gases, publicados na literatura, abrindo a possibilidade de uma futura substituição do próprio SF-6, se aceleraram. Assim sendo, os estudos para a substituição do SF-6 podem ser considerados uma meta a curto prazo. Pode-se pensar, em médio prazo, o estudo do descarte do SF-6 e seu impacto ambiental e o desenvolvimento de metodologias e critérios para determinar o dimensionamento de subestações compactas com os novos gases; e, em longo prazo, o desenvolvimento de metodologias que permitam quantificar e comparar a confiabilidade entre diferentes tipos e arranjos de subestações de alta tensão, com os novos gases isolantes. O Gráfico 50 mostra como se comporta a evolução da maturidade.

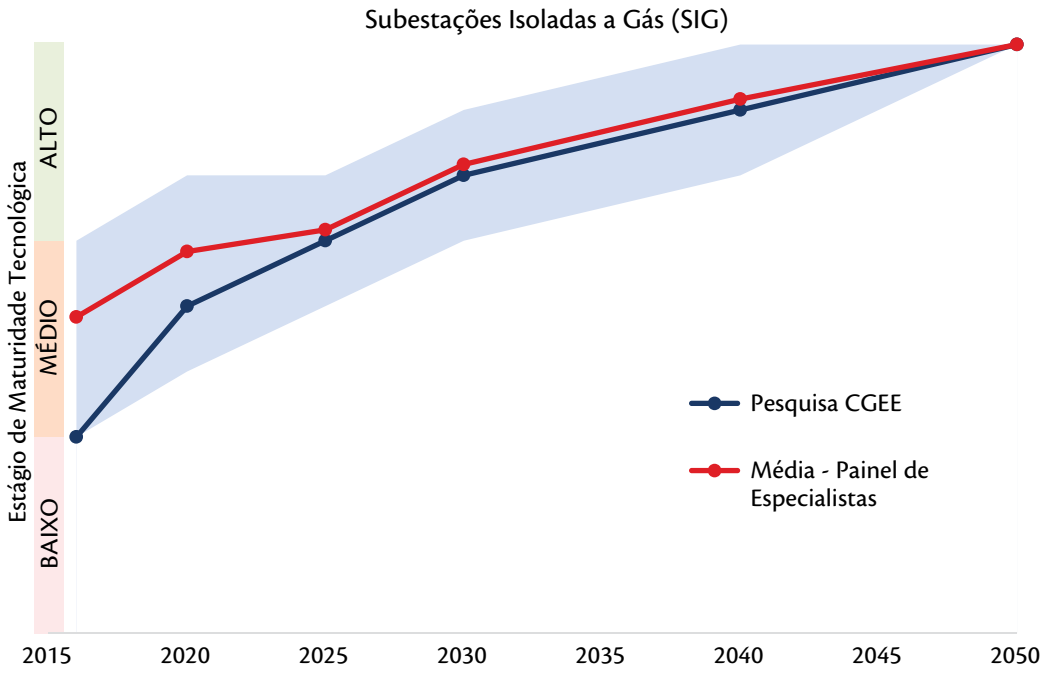

Gráfico 50 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Subestações Isoladas a Gás (SIG)

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Subestações Híbridas (SH)

São um recurso usado principalmente na remodelação e na ampliação de subestações ao ar livre. Imóveis caros e procedimentos de aprovação cada vez mais complexos tornam espaço e tempo os fatores de custo principal na expansão das subestações. Com disjuntores, seccionadores, chaves de aterramento e transformadores de instrumento alojados em compartimentos herméticos, isolados a SF-6, muitas das pesquisas necessárias serão vistas a seguir. Mas, além disso, em curto prazo, é necessário avaliar a propagação de transitórios entre interfaces isoladas a ar e a gás e os critérios de proteção contra descargas atmosféricas. A médio prazo, as metodologias e os critérios de desempenho para a avaliação do impacto da hibridização de subestações existentes têm de ser desenvolvidos, bem como as normas necessárias para a sua implantação. Em longo prazo, a avaliação do envelhecimento dos equipamentos da SE e o estabelecimento dos procedimentos para a substituição serão fundamentais. O Gráfico 51 mostra a evolução da maturidade da rota.

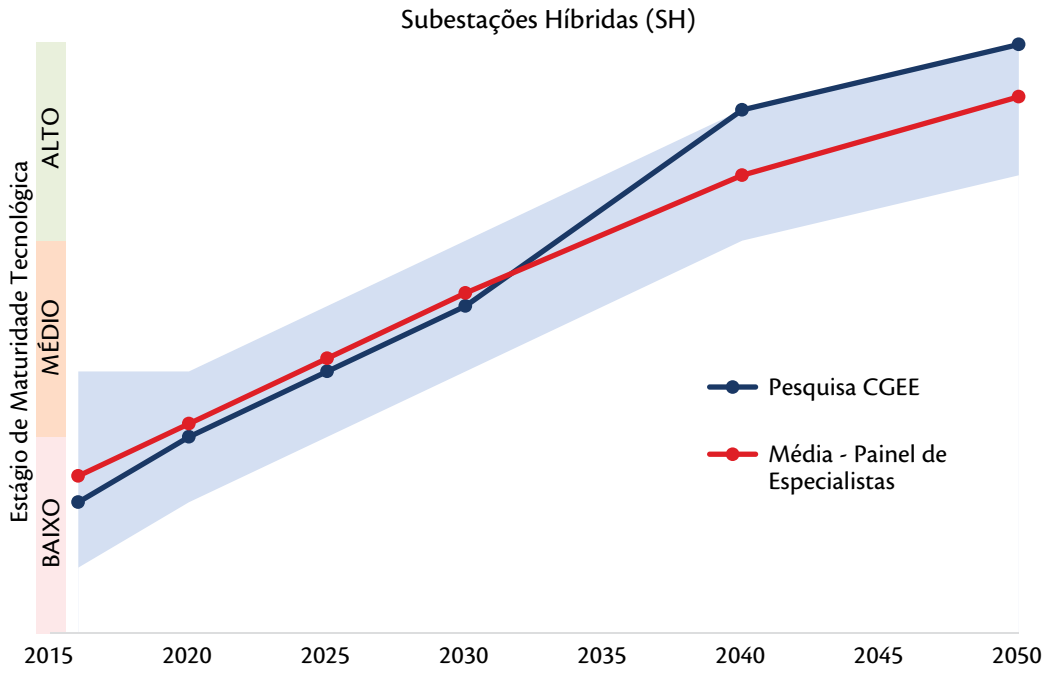

Gráfico 51 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Subestações Híbridas (SH)

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 da evolução das rotas SIA, SIG e SH

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Subestações de Alta Tensão	Subestações Isoladas a Ar (SIA)	Fatores portadores de futuro	Conhecimento físico, mas sem ensaios laboratoriais		Ensaios laboratoriais em protótipos	Avaliação da compatibilidade eletromagnética	Limitação física da compactação	Conhecimento técnico total
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Subestações Isoladas a Gás (SIG)	Fatores portadores de futuro	Estudos e ensaios laboratoriais promissores		Ensaios em protótipos	Ensaios em ambiente operacional simulado	Ensaios em ambiente operacional real	Conhecimento técnico total
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO			ALTO	
	Subestação Híbridas (SH)	Fatores portadores de futuro	Estudos e ensaios laboratoriais em realização		Avaliação de resultados	Ensaios laboratoriais em protótipos	Avaliação da compatibilidade eletromagnética	Conhecimento técnico total
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

8.3.2. Temática soluções em automação de subestações (SE)

Roadmap tecnológico

As rotas tecnológicas são apresentadas a seguir:

Rota - Metodologias e tecnologias de monitoramento para equipamentos

Para manter altos níveis de disponibilidade enquanto também controla os custos de manutenção nesse novo ambiente, as concessionárias de energia devem contar com ferramentas que permitam o

monitoramento da condição eficaz (e idealmente automatizada) de equipamentos e componentes. Com base nos dados obtidos, ações como manutenção, reparação ou substituição podem ser agendadas em tempo hábil. Informações assim também podem ajudar a otimizar o uso do equipamento, como na avaliação dinâmica, e devem ser desenvolvidas em curto prazo. As condições de monitoramento de ativos de rede referem-se à gravação de parâmetros tais como temperatura, pressão, carga mecânica, corrente de fuga, perdas dielétricas, concentração de gás etc. Em médio prazo, a avaliação da condição ou os diagnósticos envolvem o processamento e a interpretação de todos esses dados, que demandam ainda muito estudo. Idealmente, a avaliação da condição deve ser baseada em dados que permitam avaliar, mais diretamente, qual é o tempo de vida residual ou o risco de falha do componente monitorado. Infelizmente, não há ainda nenhum parâmetro que produzirá uma resposta clara e inequívoca a este questionamento. Em vez disso, as medições atuais limitam-se às propriedades que fornecem apenas uma indicação da condição do equipamento em monitoramento. Além disso, novos parâmetros de interesse primário podem não ser facilmente medidos, devido a limitações práticas atuais, e devem ser determinados em longo prazo. Isto restringiria menos a capacidade de tirar conclusões objetivas. O Gráfico 52 mostra a evolução da maturidade da rota.

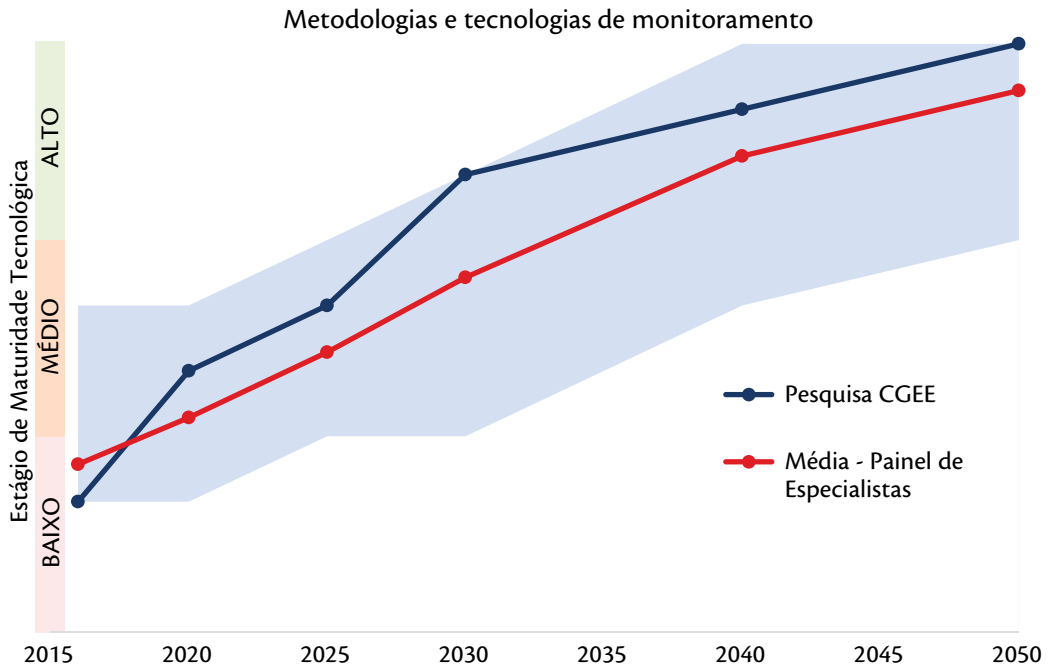

Gráfico 52 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Metodologias e Tecnologias de Monitoramento

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 Metodologias e Tecnologias de Monitoramento para Equipamentos

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Soluções em Automação de Subestações (SE)	Metodologias e Tecnologias de Monitoramento para Equipamentos	Fatores portadores de futuro	Tecnologia em definição		Tecnologia bem definida	Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Conhecimento técnico total após ajustes
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO			ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

8.3.3. Temática Transformadores e Buchas

Roadmap tecnológico

As rotas tecnológicas são apresentadas a seguir:

Rota - Transformador defasador (*phase-shifting transformers*)

A distribuição do fluxo de energia entre duas linhas paralelas é ditada por suas impedâncias. A linha com a reatância menor leva a maior parte da carga. Na maioria das situações, uma das duas linhas estará operando bem abaixo da sua classe nominal, porque, caso contrário, a linha paralela pode ser sobrecarregada. Os **transformadores defasadores** são um meio útil de controle desse fluxo de potência ativa. Uma simulação digital em tempo real realizada ilustra a capacidade de regular a potência ativa transmitida ao longo de uma linha. Existem diferentes formas de apresentação dos transformadores

defasadores. A versão assimétrica é relativamente simples em comparação com a versão simétrica, mas esta altera a amplitude de tensão. A configuração indireta oferece um projeto modular mais fácil, mas o custo total é maior do que o da versão direta. Além dos desenvolvimentos possíveis já citados para outros transformadores (otimização do meio refrigerante, normalização brasileira etc.), a modelagem de desempenho elétrico do transformador defasador para altas frequências precisa ser realizada em médio prazo. O Gráfico 53 mostra a evolução da maturidade da rota.

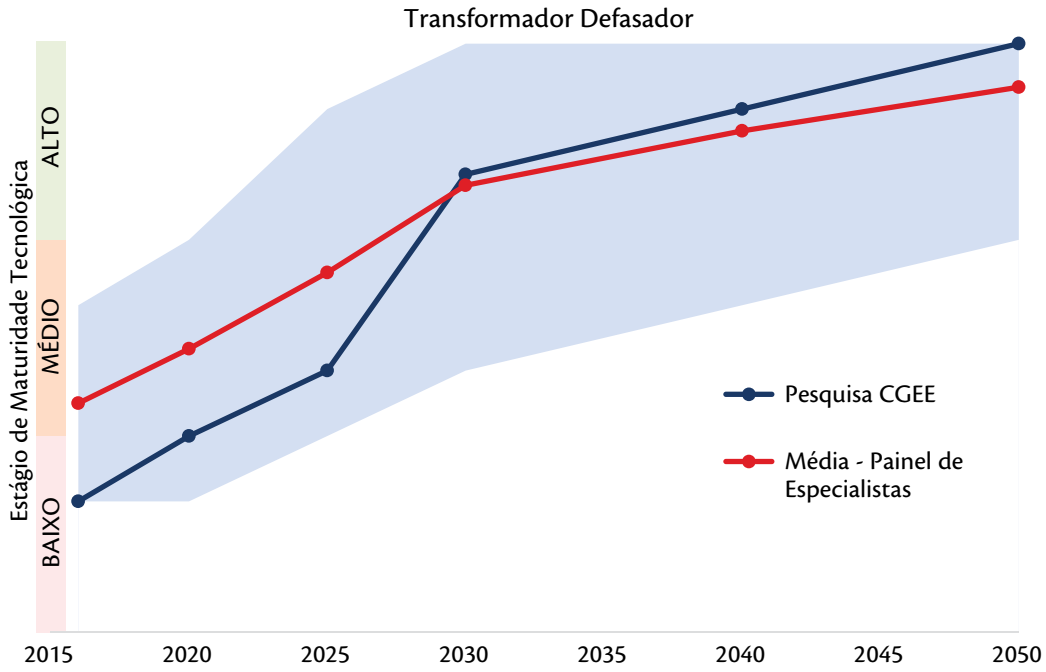

Gráfico 53 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transformador Defasador

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Novas tecnologias envolvendo Transformadores de Potência

Os **transformadores de força**, por serem os elementos mais caros no projeto de uma subestação, demandam cuidados tanto no projeto quanto na montagem. Apesar de a tecnologia de transformadores de força ser considerada madura, ainda existem diversos tópicos que necessitam de estudo a curto prazo como a otimização da impedância de curto-circuito, de acordo com as condições operacionais do transformador, visando à melhoria na operação em sobrecarga, otimização dos sistemas de refrigeração com a combinação de materiais desenvolvidos com nanotecnologia a óleo utilizado

como isolante/refrigerante e desenvolvimento de novos sistemas de monitoramento para a estimativa do estado e da vida útil remanescente de transformadores em serviço. Em médio prazo, pode-se considerar os estudos para o desenvolvimento de novos projetos construtivos (para a melhoria do campo magnético) e de novos sistemas de regulação, principalmente para UAT, e os estudos para a avaliação do desempenho elétrico do transformador para altas frequências e com transitórios muito rápidos. Em longo prazo, pode-se considerar o estudo do emprego de novos materiais como isolante/refrigerante no lugar do óleo e o emprego de novas ligas de aço, desenvolvidas com nanotecnologia, para a fabricação do núcleo dos transformadores de força, permitindo uma redução das perdas e talvez de suas dimensões, favorecendo os processos de compactação. Cabe ressaltar que todos estes estudos devem ser realizados em conjunto com grandes fabricantes de transformadores devido à falta de disponibilidade de transformadores de força para o estudo e o controle da tecnologia por parte dos fabricantes. Esta interação seria muito proveitosa para os pesquisadores brasileiros. O Gráfico 54 mostra a evolução da maturidade tecnológica da rota em nível nacional.

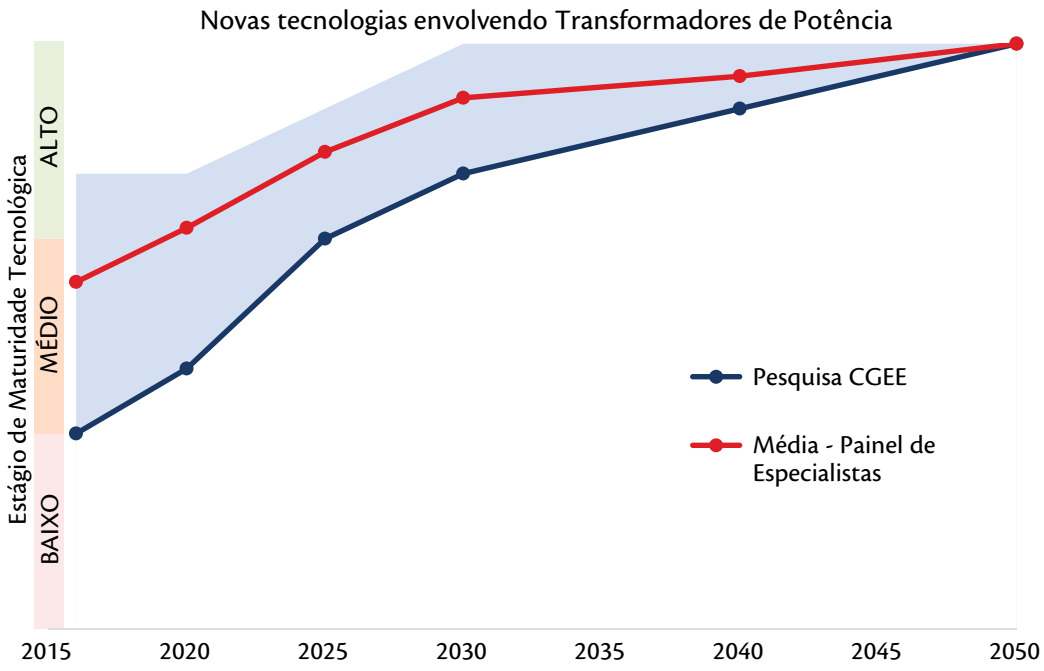

Gráfico 54 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Transformadores de Potência

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Novas tecnologias envolvendo buchas

Estas podem ser divididas em duas - as de parede e as de equipamentos, cada uma com seus problemas. As de parede necessitam, em curto prazo, do desenvolvimento de novos materiais capazes de reduzir as concentrações de campo elétrico interno e de tecnologia para evitar falhas devido à umidificação não uniforme. Esta umidificação ocorre quando a direção da chuva faz com que parte da bucha não seja umidificada devido ao bloqueio imposto pela parede que a sustenta. A tecnologia para monitoramento *online* do desempenho das buchas está em implantação, mas necessita em curto prazo de recursos para seu desenvolvimento, pois é fundamental para o controle operacional da subestação. Em médio prazo, o desenvolvimento de buchas poliméricas, em UAT, tanto para corrente contínua quanto para corrente alternada, é fundamental para reduzir os custos das instalações. Deve-se considerar, também, o desenvolvimento de novos meios isolantes/refrigerantes, pois é muito importante manter a temperatura baixa em uma bucha de UAT. As buchas para equipamentos (transformadores, cabos, capacitores etc.) apresentam problemas com chuvas intensas, temperatura e poluição que podem ser solucionados em curto prazo se houver interesse e dedicação. Em curto prazo, pode-se considerar, também, a implantação nas buchas já existentes de sensores (descargas parciais, capacitância e tg δ) para avaliar as suas condições operacionais, o que é fundamental para aumentar a confiabilidade. Em médio prazo, o desenvolvimento e a implantação de um programa computacional com capacidade de prever o risco para a subestação com a falha em buchas vêm trazer uma ótima ferramenta para a segurança pessoal e institucional de uma subestação e nos estudos de compactação. Em longo prazo, o uso de materiais termocrômicos no revestimento das buchas poliméricas e os estudos para melhorar a distribuição de potencial ao longo da superfície de uma bucha se constituem em um desenvolvimento importante e que trará melhora significativa na sua confiabilidade. O Gráfico 55 mostra a evolução da maturidade da rota.

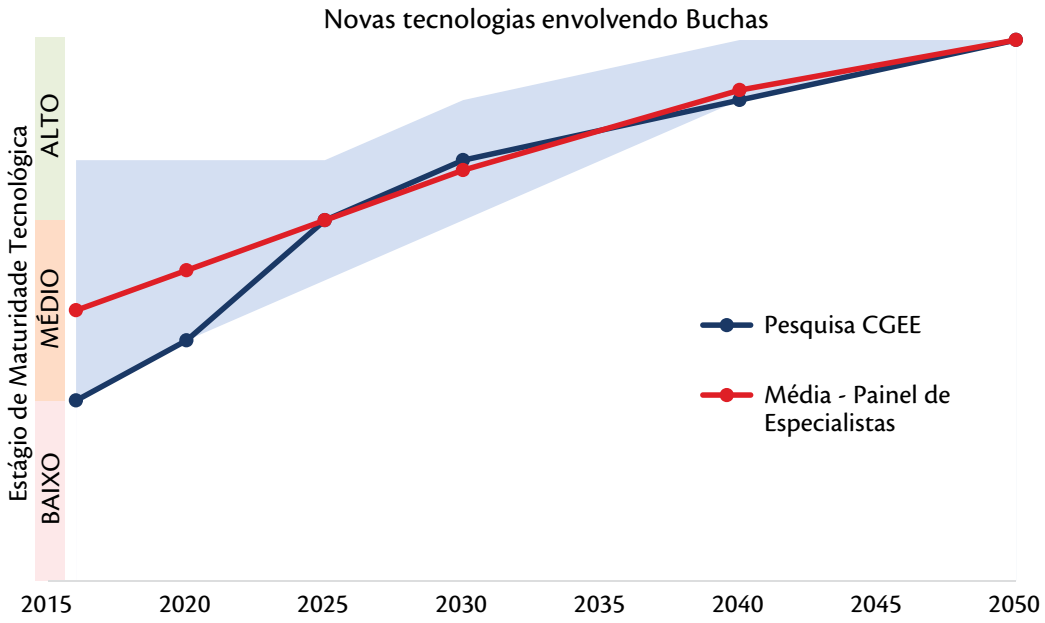

Gráfico 55 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Buchas

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Transformador Defasador, Novas Tecnologias Envolvendo Transformadores de Potência e Novas Tecnologias Envolvendo Buchas

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Transformadores e Buchas	Transformador Defasador (phase-shifting transformers)	Fatores portadores de futuro	Tecnologia bem definida		Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Ajustes após avaliação em campo	Conhecimento técnico total
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Novas Tecnologias Envolvendo Transformadores de Potência	Fatores portadores de futuro	Tecnologia bem definida		Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Ajustes após avaliação em campo	Conhecimento técnico total
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO			ALTO	
	Novas Tecnologias Envolvendo Buchas	Fatores portadores de futuro	Tecnologia bem definida		Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Ajustes após avaliação em campo	Conhecimento técnico total
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO			ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

8.3.4. Temática equipamentos de medição

Roadmap tecnológico

Rota - Novas tecnologias envolvendo equipamentos de medição (TC e TP)

Os **transformadores de corrente** (TCs) e **transformadores de potencial** (TPs) possuem uma tecnologia bem conhecida, sendo inclusive fabricados no Brasil. Devido a diversas falhas em que a projeção

de pedaços causou danos a outros equipamentos de uma subestação, há a necessidade, em curto prazo, de procurar inserir nas normas técnicas o ensaio com limite de projeção de resíduos em caso de explosão, semelhante ao existente em para-raios. Outra possibilidade é avaliar a substituição por transformadores com revestimento polimérico. Em médio prazo, a tecnologia de TCs e TPs óticos desponta como bastante promissora. A ausência de ruído devido ao uso de fibra óptica, a ausência de correntes eletromagnéticas parasitas e de saturação magnética, ferrorressonância e histerese por não ter núcleo, e a redução das dimensões, favorecendo a compactação das subestações, aparecem como suas melhores características, mas a necessidade de normas de especificação brasileiras, o desenvolvimento de metrologia para a sua aferição, a existência de erros de medição devido à indução provocada pelo campo magnético elevado gerado por outros cabos e distúrbios na medição, causados pelo efeito da temperatura sobre o sensor, indicam que ainda há a necessidade de muitos estudos até a solidificação dessa tecnologia. Deve-se considerar, também, em longo prazo, o desenvolvimento de TCs e TPs para UAT com isolamento em SF-6 ou outro nanofluido isolante (ver Gráfico 56).

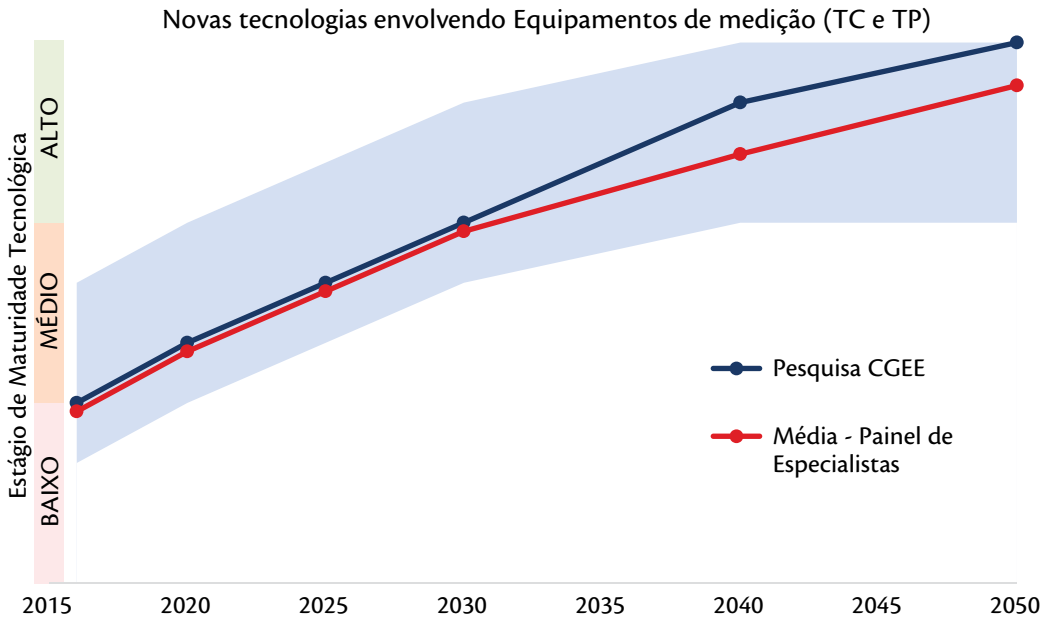

Gráfico 56 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Equipamentos de Medição - TC e TP

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
Novas Tecnologias Envolvendo Equipamentos de Medição

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Equipamentos de Medição	Novas Tecnologias Envolvendo Equipamentos de Medição (TC e TP)	Fatores portadores de futuro	Tecnologia bem definida		Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Ajustes após avaliação em campo	Conhecimento técnico total
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

8.3.5. Temática equipamentos de manobras

Roadmap tecnológico

Rotas - Novas tecnologias envolvendo Disjuntores e Novas tecnologias envolvendoseccionadores

Em curto prazo, será necessário avaliar a metodologia para ensaios dielétricos, pois, dependendo do projeto, não há a possibilidade de se montar os arranjos normalizados dentro dos laboratórios de ensaio. Neste caso, monta-se o equipamento e executa-se o ensaio sem saber da sua real validade. Em médio prazo, é preciso elaborar as especificações para emprego em UAT e dispor de laboratórios capazes de executar a sua avaliação, principalmente sob chuva intensa, e avaliar os esforços admissíveis pelas seccionadoras existentes frente ao incremento dos níveis de curto-circuito devido à expansão do sistema. Em longo prazo, a disponibilidade de novos gases isolantes para os disjuntores em UAT deve ser avaliada. Os Gráfico 57 e 58 mostram a evolução da maturidade das rotas.

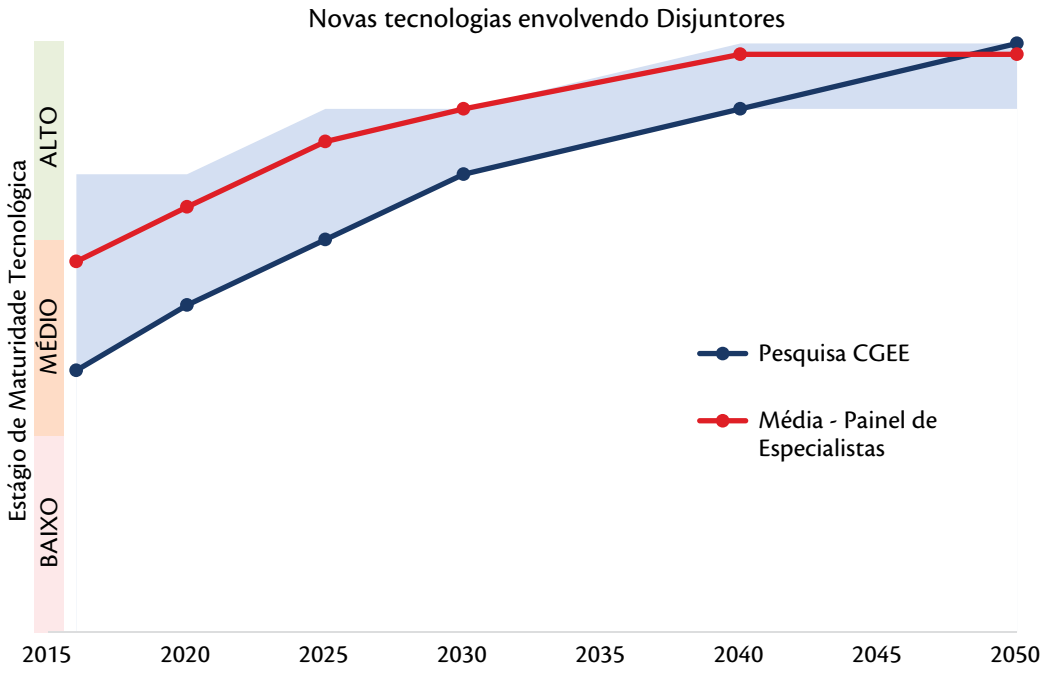

Gráfico 57 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Disjuntores

Fonte: Elaboração própria.

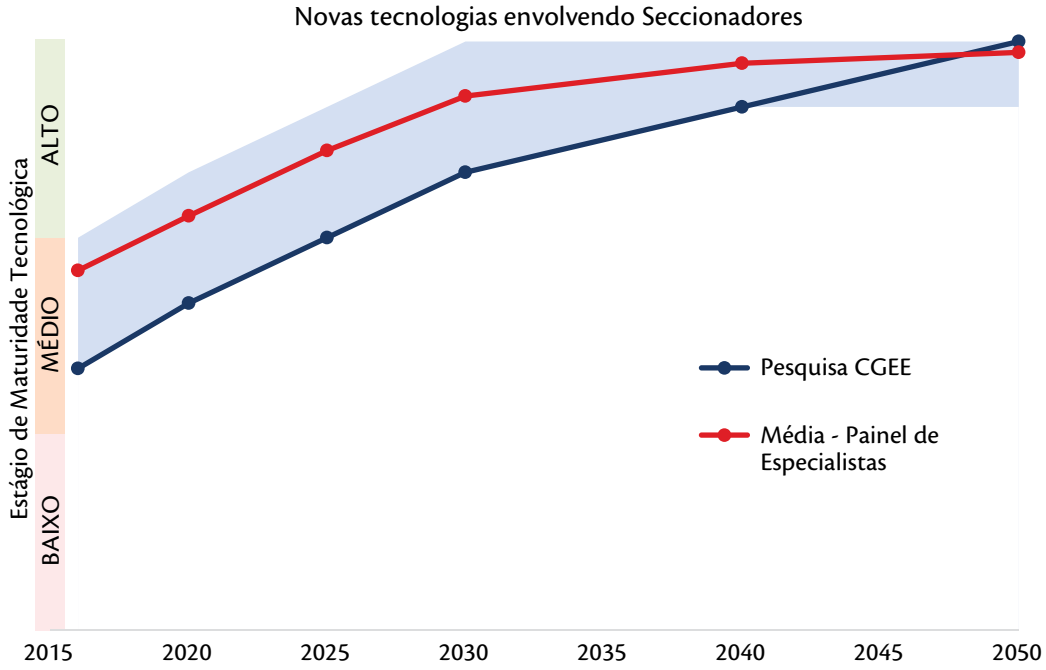

Gráfico 58 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Seccionadores

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 Novas Tecnologias Envolvendo Disjuntores e Novas Tecnologias Envolvendo Seccionadores

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Equipamentos de Medição	Novas Tecnologias Envolvendo Disjuntores	Fatores portadores de futuro	Tecnologia bem definida		Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Ajustes após avaliação em campo	Conhecimento técnico total
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
	Novas Tecnologias Envolvendo Seccionadores	Fatores portadores de futuro	Tecnologia bem definida		Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Ajustes após avaliação em campo	Conhecimento técnico total
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

8.3.6. Temática para-raios

Roadmap tecnológico

Rota - Novas tecnologias envolvendo para-raios

Os sistemas elétricos de potência estão submetidos esporadicamente a surtos de tensão, que podem ser de origem externa, provocados por descargas atmosféricas, ou de origem interna, provenientes de operações de manobra ou de ocorrência de faltas nos sistemas. Dentre os dispositivos atualmente utilizados para reduzir o efeito proveniente das sobretensões nos equipamentos instalados nas redes elétricas, o para-raios tem se mostrado o mais eficaz. Ele tem como função principal limitar as sobretensões transitórias elevadas nos terminais dos equipamentos protegidos a níveis preestabelecidos, para que o isolamento desses equipamentos não fique com as suas características afetadas após

a ocorrência de uma sobretensão. Atualmente, os ensaios laboratoriais devem ser realizados para confirmar os resultados obtidos nos ensaios em campo. Assim sendo, em curto prazo, são necessários o desenvolvimento de metodologias e o monitoramento para a estimação do estado e da vida útil remanescente de para-raios em serviço, além da reativação do laboratório de ensaios para para-raios do Cepel, que se encontra desativado desde 2014 com a aposentadoria da equipe técnica dele encarregada. Em médio prazo, pode-se avaliar o emprego de revestimentos termocrômicos nos para-raios poliméricos e o uso de novos sistemas de vedação. Em longo prazo, podem ser realizados estudos para o desenvolvimento de novos discos, mais eficientes, com o uso de nanomateriais. O Gráfico 59 mostra a evolução da maturidade da rota.

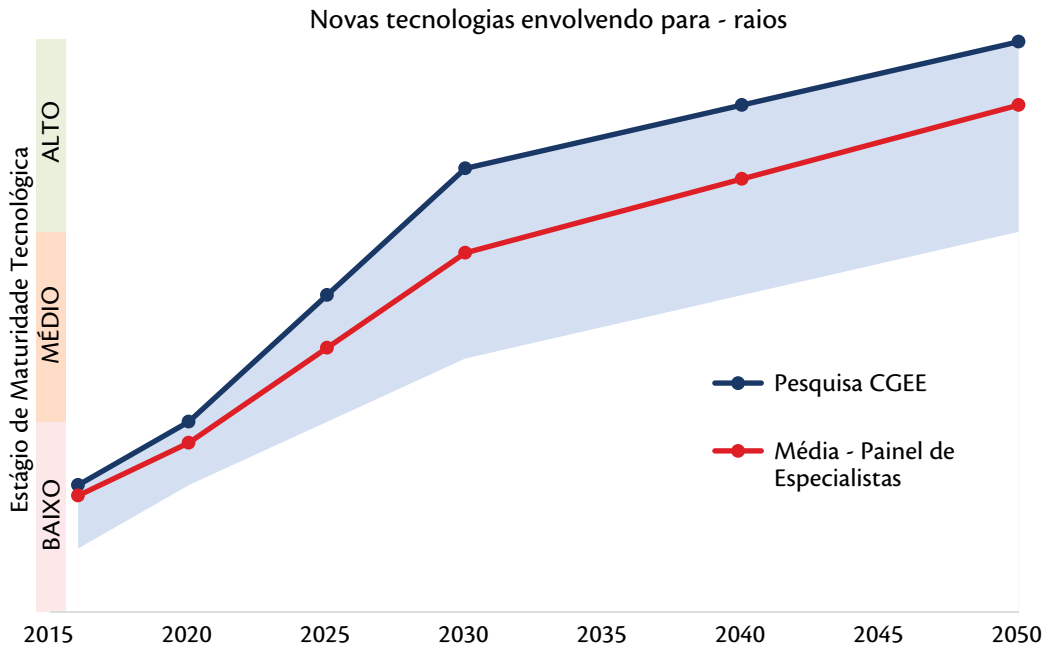

Gráfico 59 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Para-raios

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
Novas Tecnologias Envolvendo Para-raios

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Novas Tecnologias Envolvendo Para-raios	Novas Tecnologias Envolvendo Para-raios	Fatores portadores de futuro	Tecnologia bem definida		Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Ajustes após avaliação em campo	Conhecimento técnico total
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

8.3.7. Temática materiais avançados

Roadmap tecnológico

Materiais avançados aplicados a equipamentos de alta tensão: quanto a novos materiais, a nanotecnologia desponta como um mercado fundamental para o setor elétrico, pois pode ser empregada em praticamente todos os equipamentos usados em uma subestação. Em curto prazo, pode-se assinalar o desenvolvimento de materiais termocrômicos e eletrocrômicos, de novos materiais isolantes e refrigerantes para equipamentos e de novos materiais capazes de reduzir as concentrações de campo elétrico interno nas buchas, em cabos e nos capacitores. Em médio prazo, pode-se considerar o desenvolvimento e a ampliação das competências nacionais nas áreas de nanomateriais e nanofluidos; e, em longo prazo, o desenvolvimento e a ampliação das competências nacionais nas áreas de ligas amorfas e nanocristalinas. O Gráfico 60 mostra a evolução da maturidade da rota.

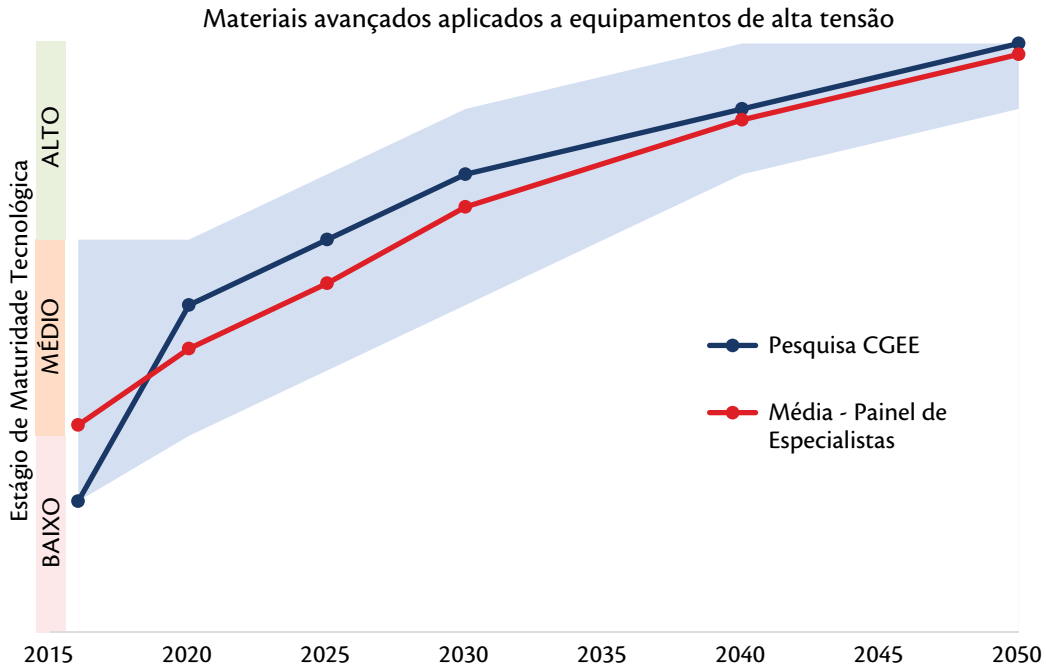

Gráfico 60 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Materiais Avançados Aplicados a Equipamentos de Alta Tensão

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 Materiais Avançados Aplicados a Equipamentos de Alta Tensão

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Materiais Avançados	Materiais Avançados Aplicados a Equipamentos de Alta Tensão	Fatores portadores de futuro	Tecnologia em definição		Maturação da tecnologia	Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Ajustes após avaliação em campo
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

8.3.8. Temática tecnologias atuais e novas tecnologias envolvendo cabos isolados em alta e extra-alta tensão

Roadmap tecnológico

Rota - Desempenho de cabos isolados em alta extra-alta tensão

Os cabos são um universo muito vasto que abrange desde os cabos isolados a SF-6 usados nas subestações compactas, até os cabos usados para iluminação e controle, passando pelos cabos nus da rede aérea das subestações ao ar livre e nas híbridas. Para os cabos empregados na rede interna de distribuição da subestação, em curto prazo, o desenvolvimento de revestimentos termocrômicos, já usados nos cabos subterrâneos e nos cabos utilizados nas redes compactas de distribuição, é muito importante. Para os cabos nus que compõem a rede aérea da subestação, o estudo da degradação dos cabos e a redução do ruído e do corona, principalmente sob chuva, são metas a serem obtidas em curto prazo. A médio prazo, a utilização de novas ligas de alumínio e de novos encordoamentos para a redução de perdas são metas a serem obtidas. A evolução de maturidade pode ser observada no Gráfico 61.

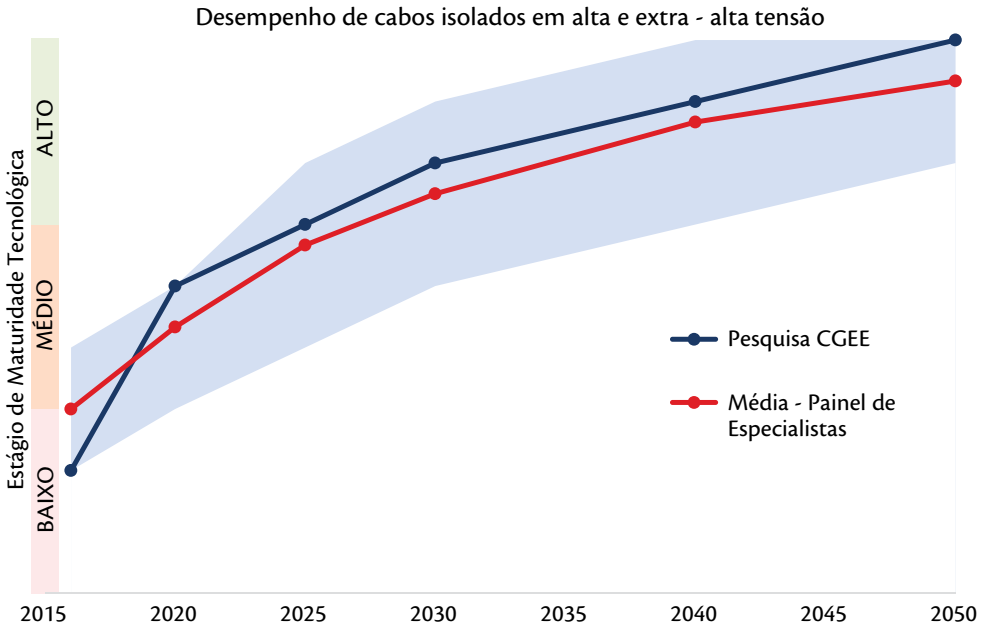

Gráfico 61 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desempenho de Cabos Isolados em alta e Extra-alta Tensão

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 Desempenho de Cabos Isolados em Alta e Extra-alta Tensão

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Tecnologias Atuais e Novas Tecnologias Envolvendo Cabos Isolados em Alta e Extra-alta Tensão	Desempenho de cabos isolados em alta e extra alta tensão	Fatores portadores de futuro	Tecnologia em definição		Ensaios laboratoriais	Aplicação em campo	Ajustes após avaliação em campo	Conhecimento técnico total
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

8.3.9. Temática desempenho de equipamentos e subestações

Roadmap tecnológico

Rota - Aspectos naturais ou artificiais

Estudos realizados mostraram que diversas concessionárias de energia em todo o mundo apresentaram relatos consistentes, a partir de experiências operacionais, indicando que isoladores dimensionados e avaliados pelos padrões normalizados do ensaio sob chuva não apresentavam bom desempenho em eventos naturais como chuvas intensas. A norma brasileira de alta tensão (ABNT NBR IEC 60060.1), ao contrário de sua congênere da IEC, apresenta a alternativa de realizar ensaios com níveis de precipitação mais elevados que o nível normalizado (1 mm/min). Mas para fazer uso desta alternativa as concessionárias necessitam conhecer o nível de precipitação local e fazer a sua correspondência com os níveis de precipitação usados em laboratório. A radiação UV é um dos agentes responsáveis pela degradação dos revestimentos poliméricos, mas somente há a medição de radiação UV nos grandes centros habitacionais. Assim sendo, em curto prazo, é necessário instalar nas subestações estações meteorológicas automatizadas para realizar essas medições, e também do vento, temperatura e umidade. Em curto prazo, é necessário fazer também estudos para a mitigação de atividades biológicas em instalações de alta tensão, pois o crescimento de fungos tem obrigado as concessionárias a executar

a lavagem não somente dos isoladores, como é usual, mas também a de todas as estruturas das subestações a um custo muito elevado. Em médio prazo, são necessários estudos, em laboratório, para determinar a metodologia de ensaio sob chuva para equipamentos classe UAT e estudos sobre a influência da umidade elevada no desempenho dos invólucros poliméricos dos equipamentos, elemento importante para os equipamentos a serem instalados na região amazônica, que apresenta umidade relativa superior a 90%.

O desempenho dos isoladores utilizados em linhas de transmissão, linhas de distribuição aérea e subestações ao ar livre é um fator fundamental para a confiabilidade dos sistemas de distribuição de energia. Os isoladores não só devem suportar a tensão de operação normal, mas também as sobretensões sem redução no desempenho, que podem causar distúrbios, descargas disruptivas e paralisações no fornecimento de energia. A redução no desempenho de isoladores exteriores ocorre principalmente pela poluição das superfícies por depósitos conduzidos usualmente pelo ar e que podem formar uma camada isolante quando seca, ou reduzir o isolamento quando molhada. Esta poluição pode vir de um evento natural, quando derivada das condições do terreno, ou de um evento artificial, quando gerada pelo desenvolvimento humano. Em curto prazo, é necessária uma pesquisa para mapeamento nacional do tipo e da quantidade de poluição presente junto a instalações do Sistema Elétrico Brasileiro, e, além disso, a inclusão pela Aneel em seus novos editais da distância de escoamento dos equipamentos, que deve ser determinada de modo a atender aos requisitos de suportabilidade à poluição. Atualmente, a Aneel estabelece uma distância de escoamento de, no mínimo, 17 mm/kV, tanto que todos os candidatos usam este valor mínimo nas suas propostas, independentemente da região do empreendimento. Em curto prazo, é necessário desenvolver sensores para medir o nível de poluição na superfície dos equipamentos de uma subestação, além da sua aplicação nas subestações já existentes e a transmissão desses dados remotamente, para que um operador possa tomar a melhor decisão para evitar uma falha. Em médio prazo, necessita-se de um laboratório ao ar livre, em uma região com elevado nível de poluição, para avaliação dos isoladores a serem usados no Brasil, como é feito em diversos países. Em longo prazo, é preciso um laboratório de poluição para ensaiar equipamentos para a classe UAT. A rota tem sua maturidade apresentada no Gráfico 62.

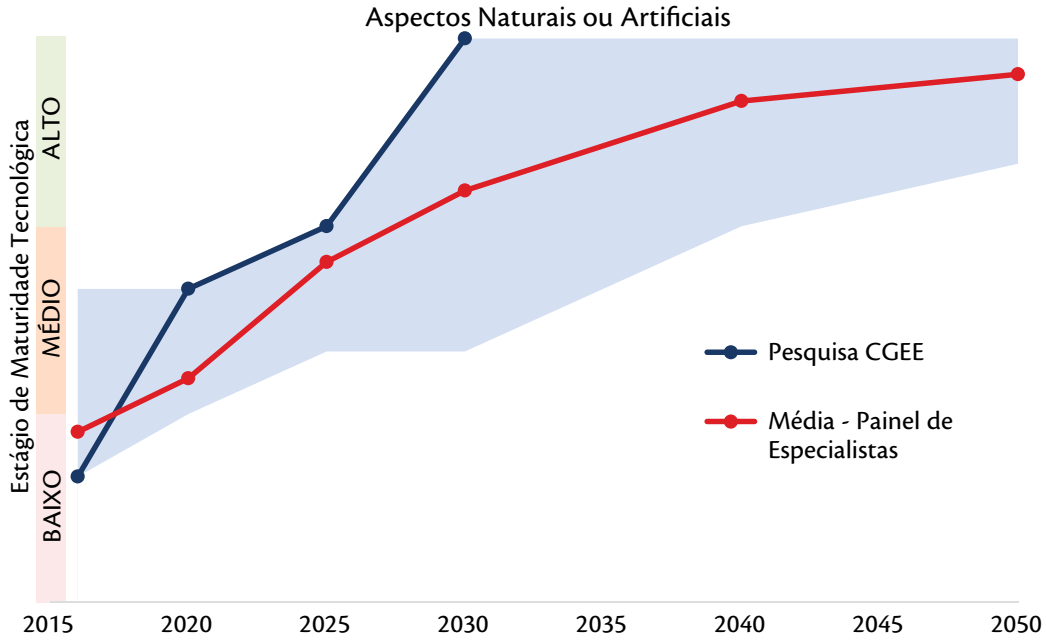

Gráfico 62 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Aspectos Naturais ou Artificiais

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 Novas Tecnologias de Aterramento

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática novas metodologias e tecnologias de sistemas de aterramento, monitoração e avaliação dos sistemas existentes e integração com as novas malhas	Novas Tecnologias de Aterramento	Fatores portadores de futuro	Conhecimento bem definido	Ensaios laboratoriais	Aplicação da tecnologia	Conhecimento técnico total		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

8.3.10. Temática novas metodologias e tecnologias de sistemas de aterramento, monitoração e avaliação dos sistemas existentes e integração com as novas malhas

Roadmap tecnológico

Rota - Novas Tecnologias de Aterramento

Um **sistema de aterramento** adequadamente projetado garante uma redução significativa dos riscos e custos associados a problemas de falhas e/ou interferência cujas consequências podem ser desastrosas, além de assegurar a melhoria do nível de proteção das instalações, dos sistemas de automação e controle, e evitar problemas quanto à compatibilidade eletromagnética. Em curto prazo, os seguintes estudos devem ser realizados: desenvolvimento de novas ligas para cabos de aterramento resistentes à corrosão e de técnicas de aterramento em UAT, aprimoramento de técnicas de eletrodos de aterramento para a transmissão em corrente contínua e o estudo da interação entre malhas existentes e as novas malhas devido à expansão das subestações. Em médio prazo, o

desenvolvimento de técnicas que permitam a localização de condutores de aterramento rompidos ou com secção insuficiente sem a necessidade de desenterrá-los, o desenvolvimento de técnicas de diagnóstico sobre a situação do aterramento com a subestação energizada e o desenvolvimento de procedimento para a recuperação de aterramento defeituoso são estudos a serem realizados. E em longo prazo, o desenvolvimento de técnicas alternativas de aterramento e o efeito no aterramento das correntes de curto-circuito devido à falha em corrente alternada e corrente contínua. O grau de evolução de maturidade da rota apresentada pode ser observado no Gráfico 63.

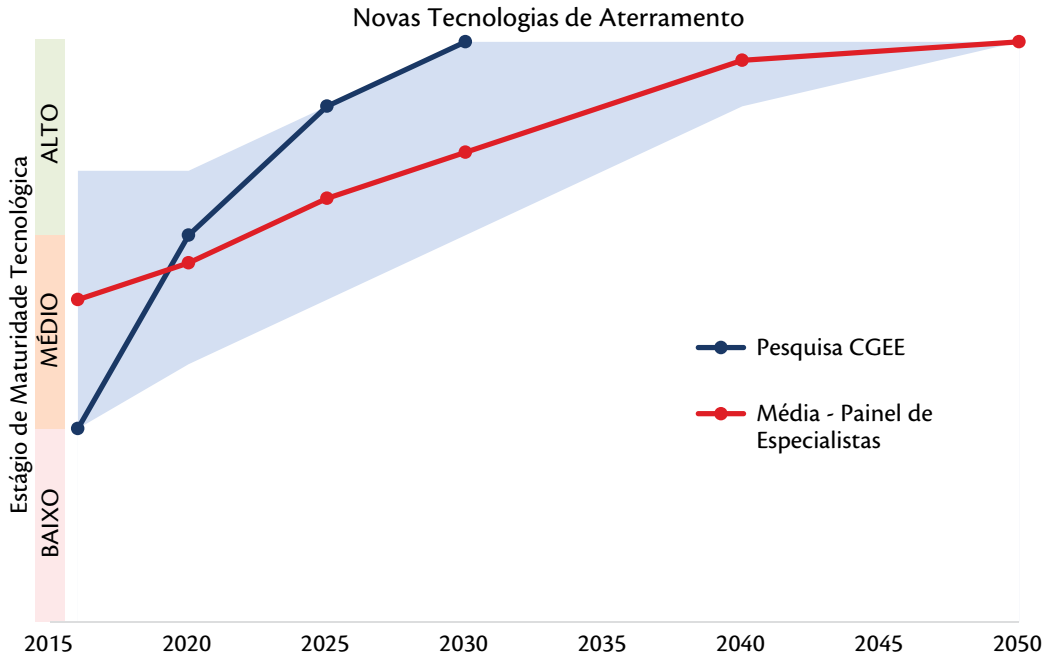

Gráfico 63 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias de Aterramento

Fonte: Elaboração própria.

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

Tabela 38 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Tecnologias de Aterramento

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática novas metodologias e tecnologias de sistemas de aterramento, monitoração e avaliação dos sistemas existentes e integração com as novas malhas	Novas Tecnologias de Aterramento	Fatores portadores de futuro	Conhecimento bem definido	Ensaios laboratoriais	Aplicação da tecnologia	Conhecimento técnico total		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

8.3.11. Temática teste e certificação de equipamentos para subestações

Roadmap tecnológico

Rota - Testes e certificações de equipamentos de UAT

Quanto à estrutura laboratorial brasileira para a execução de ensaios, atualmente ela pode ser considerada crítica. Os laboratórios existentes necessitam de investimentos para novos equipamentos, mão de obra técnica especializada para a realização de ensaios e um corpo técnico com capacidade de realizar os estudos necessários para atender o mercado brasileiro. Em curto prazo, primeiro há a necessidade de se levantar a real situação dos laboratórios existentes no Brasil, incluindo os das universidades, por uma equipe técnica com conhecimento de laboratórios de ensaio, para avaliar o volume de recursos necessários e estabelecer as metas. Segundo, é preciso fazer a implantação real da rede nacional de laboratórios, o que permitirá definir, dentre os laboratórios, quais as pesquisas que serão realizadas de acordo com a sua real capacidade, para evitar superposição de tarefas. Em médio prazo, são necessárias a construção de um laboratório interno para ensaios dielétricos em equipamentos da classe UAT e a disponibilização de uma equipe técnica com capacidade de realizá-los, pois, devido às grandes dimensões dos itens sob ensaio, as dificuldades em atender aos requisitos de ensaio serão muito grandes. Como já visto anteriormente, a construção de um laboratório ao ar livre para a avaliação de isoladores em condições naturais de poluição também é uma meta a ser realizada em médio prazo. Em longo prazo, é preciso construir um laboratório interno de poluição, um laboratório para ensaios de potência e outro laboratório mecânico para equipamentos da classe UAT.

Com a existência de uma estrutura para a realização dos ensaios, pode-se então definir procedimentos e criar competências para a certificação em UAT, além de permitir a avaliação da viabilidade de execução de testes de UAT em campo, após estudos em laboratório. Uma das principais tarefas envolvidas no desenvolvimento global de sistemas para UAT tem sido a evolução das especificações técnicas para o sistema, incluindo todos os equipamentos das subestações. A elaboração dessas especificações técnicas evoluiu graças às comissões técnicas formadas por especialistas trabalhando nas normas técnicas nacionais desenvolvidas com base em normas internacionais e continuamente monitoradas por um comitê técnico nacional. Assim sendo, em curto prazo, devem-se desenvolver procedimentos nacionais unificados para ensaios e certificação de equipamentos para alta tensão, com base nas normas brasileiras, respeitadas as condições regionais de cada concessionária. Para tanto, as concessionárias devem ser estimuladas a participar ativamente da elaboração de normas técnicas brasileiras e os editais de compra devem ser elaborados com base nessas normas, respeitando as especificidades de cada região, mas evitando a inclusão de solicitações técnicas ainda não totalmente solidificadas. Cabe lembrar que um dos parâmetros usados para avaliar o crescimento de um País é a quantidade de normas técnicas elaboradas. A evolução tecnológica pode ser observada no Gráfico 64.

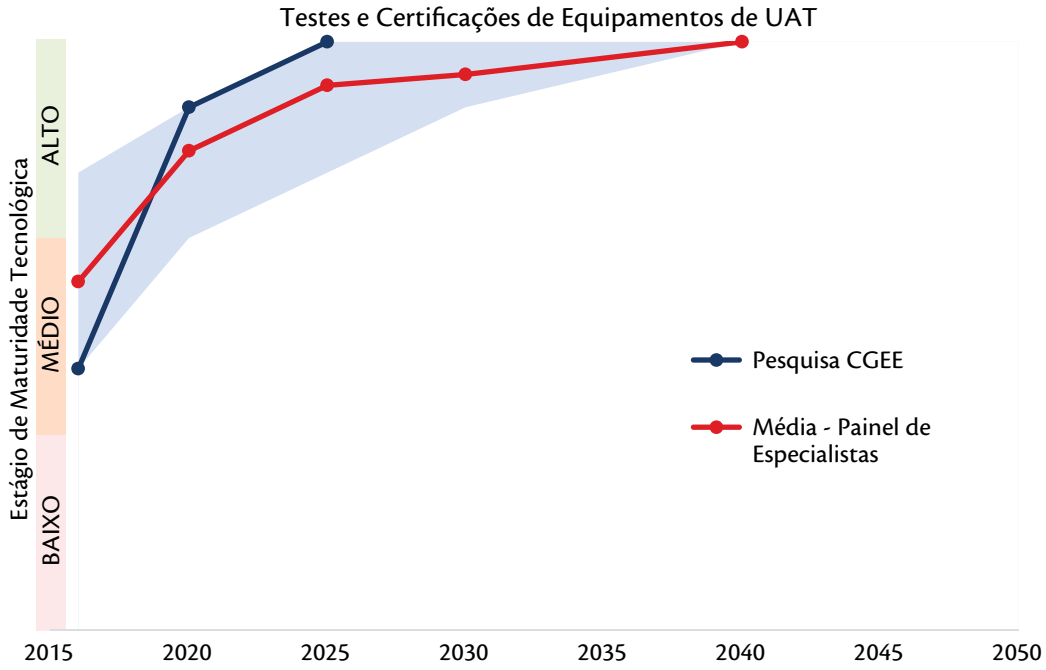

Gráfico 64 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Testes e Certificações de Equipamentos de UAT

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
Testes e Certificações de Equipamentos de UAT

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Teste e Certificação de Equipamentos para Subestações	Testes e certificações de equipamentos de UAT	Fatores portadores de futuro	Conhecimento bem definido	Ensaios laboratoriais	Aplicação da tecnologia	Conhecimento técnico total		
		Maturidade	MÉDIO	ALTO				

Fonte: Elaboração própria.

8.3.12. Temática tecnologias atuais e novas tecnologias envolvendo isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão

Roadmap tecnológico

Rota - Desempenho dos isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão:

Os isoladores tipo suporte são equipamentos aos quais, usualmente, não são dedicados muitos estudos. Mas quando eles se tornam os responsáveis por falhas, como ocorreu em Itaberá, devido a chuvas intensas, torna-se necessária a realização de estudos, em curto prazo, sobre o desempenho dos isoladores tipo suporte para UAT, assim como a realização de estudos para o desenvolvimento de revestimento polimérico termocrômico e resistentes a agentes biológicos. Em médio prazo, deve-se realizar os estudos para a substituição dos isoladores tipo suporte de porcelana por isoladores poliméricos, tanto para o suporte dos barramentos, quanto para o suporte de equipamentos. O Gráfico 65 apresenta a evolução de maturidade da rota.

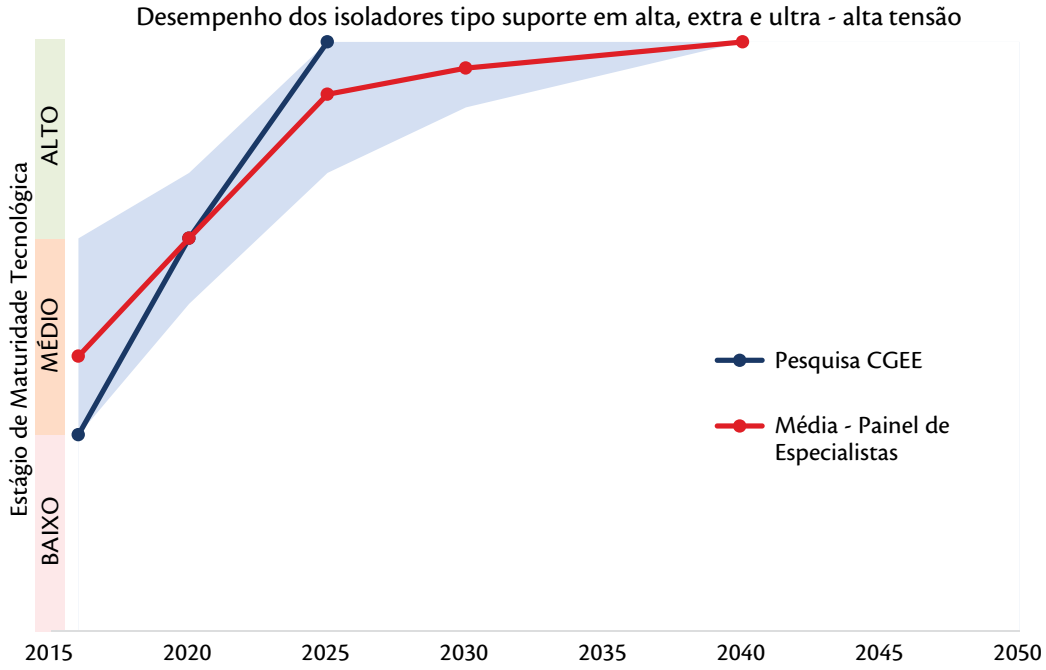

Gráfico 65 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão

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 Desempenho dos Isoladores Tipo Suporte em Alta, Extra e Ultra-alta Tensão

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática tecnologias atuais e novas tecnologias envolvendo isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão	Desempenho dos isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão	Fatores portadores de futuro	Tecnologia bem definida		Aplicação da tecnologia em campo	Conhecimento técnico total		
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			

Fonte: Elaboração própria

8.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), 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 essa macrotemática, as seguintes rotas tecnológicas foram priorizadas, conforme apresentado na Tabela 41.

Tabela 41 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Equipamentos de Alta Tensão e Subestações

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Materiais avançados aplicados a equipamentos de alta tensão	Materiais avançados
2	Subestações isoladas a gás (SIG)	Subestações de alta tensão
3	Novas tecnologias envolvendo transformadores de potência	Transformadores e buchas
4	Subestações híbridas (SH)	Subestações de alta tensão
5	Metodologias e tecnologias de monitoramento para equipamentos	Soluções em automação de subestações (SE)
6	Testes e certificações de equipamentos de ultra-alta tensão (UAT)	Teste e certificação de equipamentos para subestações
7	Novas tecnologias envolvendo buchas	Transformadores e buchas
8	Novas tecnologias envolvendo equipamentos de medição (TC e TP)	Equipamentos de medição
9	Novas tecnologias envolvendo disjuntores	Equipamentos de manobras
10	Subestações Isoladas a Ar (SIA)	Subestações de alta tensão
11	Novas tecnologias envolvendo para-raios	Para-raios
12	Desempenho de cabos isolados em alta e extra-alta tensão	Tecnologias atuais e novas tecnologias envolvendo cabos isolados em alta e extra-alta tensão
13	Aspectos naturais ou artificiais	Desempenho de equipamentos e subestações
14	Novas tecnologias envolvendo Seccionadores	Equipamentos de manobras
15	Desempenho dos isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão	Tecnologias atuais e novas tecnologias envolvendo isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão
16	Transformador defasador (***phase-shifting transformers***)	Transformadores e buchas
17	Novas tecnologias de aterramento	Novas metodologias e tecnologias de sistemas de aterramento, monitoração e avaliação dos sistemas existentes e integração com as novas malhas

Fonte: Elaboração própria.

Após a apresentação das diversas rotas de conhecimento, se torna necessário priorizá-las. Essa priorização levou em conta a importância da rota para o desenvolvimento das demais rotas e a sua importância para o SEB.

- **Materiais avançados aplicados a equipamentos de alta tensão** aparecem como de importância primordial para esta macrotemática, com um estágio de maturidade baixo, pois nela estão inclusos os desenvolvimentos que serão aplicados nos equipamentos das demais rotas. Apresenta um estágio de maturidade baixo e somente chegará a um estágio alto a longo prazo.
- **Subestações Isoladas a Gás (SIG)** estão em segundo, com um estágio de maturidade entre médio e alto, porque é a melhor opção para substituir as subestações ao ar livre nos locais com problema de espaço, mas ainda não possui a confiança total do setor elétrico.
- **Novas tecnologias envolvendo Transformadores de Potência** aparecem em terceiro, apesar de estarem em um estágio de maturidade entre médio e alto por este ser o equipamento de maior importância em uma subestação e que, em caso de falha, pode trazer comprometimentos para todo o sistema elétrico.
- **Subestações Híbridas (SH)** estão na quarta posição, com um estágio de maturidade entre baixo e médio, pois são uma ótima opção nos projetos de subestação, mas necessitam de muito estudo para ter a confiabilidade necessária e atingir um estágio alto de maturidade.
- **Metodologias e tecnologias de monitoramento para equipamentos** encontram-se na quinta posição, com um estágio de maturidade entre baixo e médio, pois, devido à pouca disponibilidade de pessoal, a necessidade de informações *online* é de fundamental importância na tomada de decisões. Além disso, seu desenvolvimento implementa o desenvolvimento das demais rotas.
- **Testes e certificações de equipamentos de UAT** estão na sexta posição porque a estrutura laboratorial brasileira atualmente pode ser considerada crítica e não se pode tratar do desenvolvimento de equipamentos ou tecnologias se não houver local para ensaiá-las e avaliar seu desempenho. Apresenta um nível de maturidade médio, podendo chegar a um nível alto, a médio prazo, principalmente em UAT, caso haja investimentos consistentes.
- **Novas tecnologias envolvendo Buchas** aparecem na sétima posição, em um estágio de maturidade entre baixo e médio, mas estão muito relacionadas a todas as rotas com o tópico transformadores e, por ser o elemento que usualmente mais apresenta defeitos, necessita de estudos para melhorar a sua confiabilidade.
- **Novas tecnologias envolvendo Equipamentos de Medição (TC e TP)** encontram-se na oitava posição, apesar de estarem em estágio de maturidade entre médio e alto, devido à sua importância no fornecimento de informações complementares à rota "monitoramento".

- **Novas tecnologias envolvendo Disjuntores** estão em nono, apesar de apresentarem um estágio de maturidade de médio para alto, porque as falhas que ocorreram recentemente indicam a necessidade de estudos para a melhoria de desempenho e confiabilidade.
- **Subestações Isoladas a Ar (SIA)** aparecem na décima posição, com um estágio de maturidade entre médio e alto, pois, apesar de ser uma tecnologia bem conhecida do setor elétrico, a necessidade de compactação demanda estudos e ensaios a serem realizados.
- **Novas tecnologias envolvendo para-raios** entram nesta posição porque apresentam estágio de maturidade entre baixo e médio, mas somente atingirão um estágio alto a longo prazo, dependendo dos desenvolvimentos nos materiais avançados. Poderia facilmente trocar de lugar com cabos, pois ambos se encontram no mesmo estágio.
- **Desempenho de cabos isolados em alta e extra-alta tensão** enquadra-se nesta posição pois apresenta estágio de maturidade entre baixo e médio, mas somente atingirá um estágio alto a longo prazo, dependendo dos desenvolvimentos dos materiais avançados.
- **Aspectos naturais ou artificiais** encontram-se nesta posição, pois apresentam um estágio de maturidade entre baixo e médio, principalmente quanto à poluição, mas somente atingirão um estágio alto a longo prazo. Seu desenvolvimento e implantação, apesar do baixo custo, necessitam de forte apoio governamental, pois abrange todo o território nacional envolvendo todas as empresas do setor elétrico.
- **Novas tecnologias envolvendo Seccionadores** aparecem nesta posição porque são consideradas em um estágio de maturidade de médio para alto e os estudos necessários, apesar de importantes, não afetam seu desempenho enquanto não realizados.
- **Desempenho dos isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão** aparece nesta posição por apresentar um estágio de maturidade entre médio para alto, por ser amplamente utilizado pelo setor elétrico, mas a sua evolução para atingir um estágio mais elevado depende dos desenvolvimentos nos materiais avançados que permitirão a obtenção de novos perfis, evitando o problema com chuvas intensas.
- **Transformador defasador *(phase-shifting transformers)*** encontra-se nesta posição por ser um equipamento com estágio de maturidade baixo e que demandaria muito tempo para atingir um estágio médio, além de ser um equipamento ainda em implantação no setor elétrico.
- **Novas Tecnologias de Aterramento** estão nesta posição porque encontram-se em um estágio de maturidade considerado de médio para alto e os estudos necessários, apesar de importantes, não afetam seu desempenho enquanto não realizados.

Capítulo 9

Capítulo 9

Macrotemática Operação e Manutenção dos Sistemas de Transmissão

Devido às características peculiares do sistema de transmissão e à importância do SIN no desenvolvimento do País, são constantemente exigidas nas instalações o emprego de novas tecnológicas e a utilização de processos eficientes na execução das atividades, além da contínua atualização dos profissionais responsáveis por manter e operar os ativos nas condições atuais, e principalmente a sua preparação técnica e psicológica para suportar os novos desafios que surgirão a curto e médio prazos.

Para facilitar o entendimento, a macrotemática foi subdividida nas temáticas de operação do sistema e de manutenção da transmissão, por constituírem seus temas principais. Para a temática operação do sistema optou-se por valorizar rotas tecnológicas nas áreas de estudos elétricos especiais, segurança do sistema e de operação em tempo real. Para a temática manutenção da transmissão, foram priorizadas as rotas tecnológicas relacionadas à engenharia e à execução da manutenção, ao monitoramento de parâmetros de equipamentos e aos sistemas e avaliação de ativos.

9.1. Visão de futuro

9.1.1. Cenário setorial

A participação de um número cada vez maior de empresas nas atividades de transmissão no Brasil, influenciadas pela liberação do setor, o emprego de transmissão em corrente contínua (*High Voltage Direct Current* - HVDC) em grande escala e a integração de fontes renováveis de energia como resultado das exigências ambientais levam a sistemas de transmissão de energia mais diversificados, o que resulta em maior complexidade a ser empregada nas ações de O&M.

Modernizar as áreas de O&M, para que haja uma adaptação ao ambiente em rápidas mutações, um estabelecimento de sinergias entre os operadores de diferentes tecnologias e a valorização do conhecimento de ferramentas de apoio a decisões, é um desafio a ser superado. Somados a este desafio estão as inevitáveis pressões competitivas e ambientais exigidas e a gerência de transferência de energia por meio de um complexo sistema de transmissão, crescente, interconectado e com tecnologia continuamente modernizada.

9.1.2. Objetivo geral

Visualiza-se alcançar uma modernização relacionada a esta macrotemática pautada na: uniformização, integração e otimização de processos, automação de instalações e implantação de tecnologias constantemente atualizadas nas instalações do SIN.

O Brasil tem todas as condições para desenvolver as soluções, buscando ser referência e com o diferencial de atender às peculiaridades do sistema elétrico brasileiro. Por se tratar de tema bastante amplo, parte das soluções desenvolvidas em outros países pode ser aproveitada nas empresas brasileiras. Uma alternativa aos sistemas já existentes nas empresas é desenvolver soluções que integrariam novas funcionalidades com a característica de interoperabilidade com os sistemas presentes atualmente.

O objetivo é melhorar a qualidade do serviço e do produto para fazer frente às novas exigências do mercado e adequar as atividades de operação e manutenção para atender às novas necessidades do setor elétrico. A visão funcional e operacional direciona trabalhos e tarefas a serem executados nas diversas áreas de O&M, incluindo seus aspectos organizacionais, gestão de riscos, aumento da consciência da complexidade do sistema elétrico nacional e novas exigências de conhecimento e formação para engenheiros e técnicos do setor, principalmente para operadores de centro de controle e técnicos de manutenção, no aspecto das novas tecnologias empregadas, segurança do sistema e das instalações.

9.1.3. Objetivo específico

Curto prazo (2017-2020):

- Uso de *drones* e robótica;
- Atualização e modernização dos métodos de manutenção de SEs e em LTs;
- Interferência dos harmônicos no sistema.

Médio prazo (2020-2030):

- Requisitos para a criação de ambientes automatizados;
- Utilização de dados meteorológicos em decisões operativas;
- Dispositivos de segurança;
- Novos sensores de monitoramento de instalações;
- Partes de SEs móveis na transmissão;
- Descartes de ativos;
- Técnicas de manutenção sem desligamentos;
- Vida remanescente;
- Revitalização e repotenciação;
- Sistemas especiais apoiados em PMU.

Longo prazo (2030-2050):

- Item interferências do clima no desempenho de instalações em áreas típicas;
- Identificação de gás para substituir o SF6 em equipamentos.

9.1.4. Fundamentação

Hoje em dia, com poucas exceções, os sistemas de transmissão, de uma forma simplificada, são gerenciados com ações preventivas e programadas como regra geral para otimizar as redes. Este procedimento pode ser entendido devido à necessidade sempre crescente de aumentar a "observabilidade" (o conhecimento das interferências dinâmicas que podem causar instabilidades, por exemplo) e a "controlabilidade" dos sistemas (o emprego de esquemas e de sistemas especiais que proporcionam ações automáticas e eficientes, entre outros). No entanto, com as melhorias da "observabilidade" e da "controlabilidade" dos sistemas, novos controles poderão surgir e ser implementados, aumentando ainda mais a complexidade dos sistemas. Para melhor lidar com esta expectativa, deve-se imaginar que controles em tempo real da rede de transmissão poderão um dia chegar ao nível próximo ao dos controles já existentes em aeronaves, em que os aviões são projetados para serem totalmente instáveis e, por isso, são complexos demais para serem controlados pelos pilotos. O piloto atua em um modelo de avião clássico virtual e o sistema de controle automático gerencia a

transição desse avião virtual para o real nas condições extremas de instabilidade. Hoje em dia, alguns esquemas e sistemas especiais já estão atuantes, porém estamos longe de implantar mudanças que alcancem a totalidade desse avanço tecnológico.

O fundamento teórico da macrotemática Operação e Manutenção do Sistema de Transmissão do SIN visa preparar o setor para minimizar essas incertezas. Porém, os prazos previstos para a implantação das rotas dessa macrotemática, com certeza, serão curtos o bastante para tornar improvável que tecnologias imprevistas tenham impactos importantes no SIN nesse período (C2, CIGRÉ, 2008).

Neste contexto, as indisponibilidades dos sistemas de transmissão também deverão ser constantemente avaliadas e minimizadas, seja por meio de investimento em manutenções, sem a necessidade de desligamentos dos ativos, seja por meio de mecanismos que, em tempo real, possam melhor disponibilizar e interpretar as informações de suas condições operativas. As linhas de P&D foram idealizadas para produzir modelos que permitam o melhor entendimento desses temas, revisando os conceitos de manutenção e demonstrando como implementá-los na realidade dos custos disponíveis e dos benefícios esperados.

9.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Com base no conteúdo apresentado, o cenário futuro da macrotemática 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 de tempo até 2050 (ver Anexo). Para fundamentar essas métricas, são apresentados alguns desafios vinculados ao desenvolvimento da operação e da manutenção.

A finalidade básica da operação no controle do SIN é gerenciar o escoamento da energia gerada nas várias fontes e formas para todas as regiões do Brasil. Neste sentido, as ações sistêmicas na operação sempre terão uma importância para o desempenho do SIN e cada vez mais serão crescentes no horizonte até 2050. Vários serão os desafios que surgirão ao longo desse período, por exemplo, o controle de armazenamento de energia em grande escala, motivado principalmente pela expectativa da penetração, em compasso, de fontes intermitentes e sazonais no sistema, e a distribuição consistente dessa energia através da extensa malha de transmissão.

Com relação à implantação de novas tecnologias, a introdução de grandes blocos de energia no SIN trará fortes perspectivas de utilização de transmissão de longa distância com potencial de uso da ultra-alta tensão em corrente contínua e em corrente alternada. A utilização de sistemas em HVDC também permanece com tendência forte durante todo o horizonte até 2050.

Em função das questões socioambientais, o custo da transmissão tende, cada vez mais, a se elevar até 2050. Em decorrência, existe a tendência da otimização do uso das infraestruturas existentes antes das ampliações. Não existirão restrições para alternativas tecnológicas a serem analisadas para a ampliação e a modernização e/ou repotenciação da malha da transmissão existente e envelhecida. A modernização e/ou recapacitação dos ativos do sistema em face de seu envelhecimento ocorrerão inicialmente de forma marginal, mas deverão crescer de importância ao longo de todo o horizonte, porém sem impactar significativamente os números do planejamento.

No caso de subestações e de linhas de transmissão em regiões com alta densidade de carga, é crescente o uso da tecnologia cada vez mais compacta e otimizada (subestações isoladas a gás não poluente). Ações propostas de redução de gases de efeito estufa poderão surgir a longo prazo, com a implantação de medidas mitigatórias de emissão. As alterações climáticas deverão ser estudadas e planejadas para adaptações no SIN dessas novas condições.

Esses são alguns dos desafios tecnológicos que as equipes de O&M deverão estar preparadas para suportar nas próximas décadas. Para atender a essa demanda, será necessário o desenvolvimento de ações concretas que podem ser observadas conforme as métricas listadas abaixo e apresentadas na planilha de indicadores (ver Anexo):

- **Otimizar o processo de recomposição após falhas no sistema:** redução do tempo de indisponibilidade e otimização da recomposição autônoma e assistida. Estão previstas melhorias contínuas até 2050.
- **Facilitar as decisões em tempo real:** melhoria do entendimento de como os fenômenos meteorológicos afetam o sistema. E no horizonte de 2050, conseguir fazer o devido monitoramento.
- **Incrementar as ferramentas de apoio às ações operativas:** redução das incertezas associadas a cada decisão, com uma taxa de melhoria em percentual.
- **Novas tecnologias para a segurança sistêmica:** melhoria contínua na segurança da operação do sistema, com a identificação de critérios e o aprimoramento de técnicas, além da utilização de dispositivos de segurança.

- **Otimizar o desempenho das instalações:** melhoria contínua na operação do sistema, com a identificação das influências e consequências de fenômenos que afetam o SIN.
- **Uniformizar, atualizar e otimizar as ações de manutenção:** incentivo ao emprego de técnicas com o objetivo de reduzir as indisponibilidades e os riscos operativos, melhorando a segurança do pessoal e preservando o meio ambiente.
- **Integração de processos de análise de desempenho de instalações:** análise e introdução de conceitos atualizados de desempenho de instalações, implementando procedimentos para estender a vida útil e atualizar projetos de equipamentos e sistemas, aumentando a vida remanescente.
- **Implantação de nova tecnologia de obtenção de dados mais precisos a serem aplicados nas ações sistêmicas:** atualização do conhecimento, prevendo uma redução do tempo de indisponibilidade.
- **Incrementar as informações operativas:** atualização constante dos sistemas de supervisão e controle dos centros de operação.
- **Incrementar e otimizar as informações de manutenção:** atualização dos sensores de monitoramento e dos sistemas inteligentes de auxílio a tomadas de decisão e incentivo ao emprego de centros de monitoramento para a integração das informações de manutenção.
- **Entrada de novos agentes na transmissão:** difusão das técnicas e procedimentos empregados no setor para as áreas de O&M e para os novos agentes de transmissão.
- **Atuais agentes de transmissão:** unificação de procedimentos de operação e manutenção.
- **Evolução dos projetos de subestação:** disponibilização de informações e dados para nortear novas tecnologias em empreendimento em centros de operação, subestações e linhas de transmissão.

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. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias, as parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e SEB potencializam a melhoria ou a participação dessas questões no SEB, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

9.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas

Neste item são abordados os *Roadmaps* tecnológicos das rotas consideradas neste projeto. Conforme informado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), 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 apresentados os temas considerados 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 operação do sistema

As atividades de Operação na Transmissão do Sistema Elétrico Nacional podem ser subdivididas, de uma forma simplificada, em áreas de estudos, planejamento e coordenação, pré, pós-operação e em tempo real. O foco principal das rotas tecnológicas e linhas de P&D na macrotemática Operação do Sistema visa observar e estudar o SIN no campo dos novos métodos, tecnologias e ferramentas capazes de lidar com o processo de análise e de organização de uma imensa quantidade de informações e disponibilizá-las de forma simplificada para facilitar e subsidiar as áreas de estudos, planejamento, coordenação e tempo real.

Roadmap tecnológico

As rotas tecnológicas e suas áreas de atuação são apresentadas as seguir:

Rota - PMU na operação

O uso de tecnologia baseada em dados obtidos de PMUs implica dispor de sensores inteligentes e de comunicação integrada para resgatar informações do SIN e analisá-las, principalmente as condições dinâmicas dos sistemas. Muito ainda deve ser realizado no SIN a respeito da obtenção

dessas informações. Porém o tema se refere a desenvolvimento de *software* e de sistemas especialistas baseados em dados de PMU para apoio a operações. Esse *software* deve ser testado e os sistemas especiais avaliados e comprovados em laboratórios de simulação antes de sua aplicação. Sendo assim, espera-se um longo tempo de maturação para esse tema (ver Gráfico 66).

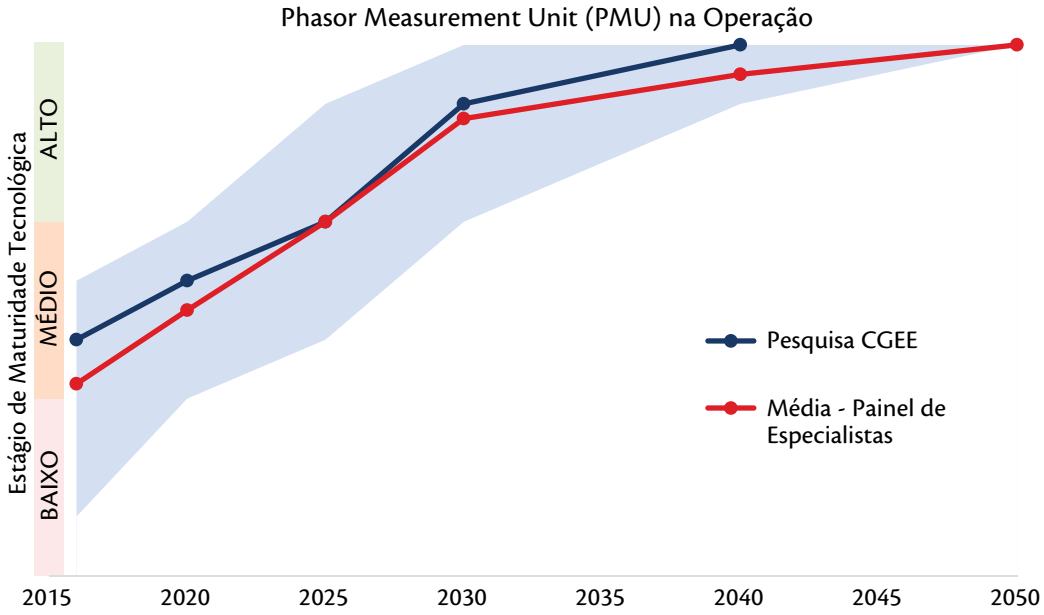

Gráfico 66 - Evolução da maturidade tecnológica da rota PMU na Operação

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Operação do sistema em tempo real

Os temas das linhas de P&D desta rota se referem ao desenvolvimento de ferramentas para serem empregadas como auxílio nas tomadas de decisões em tempo real na operação do SIN. São basicamente simulações e análises dinâmicas de situações do sistema em tempo real e são de uma maneira geral temas de conhecimento do setor, que necessitam ser desenvolvidos ao longo das expansões que o sistema vai apresentar. Por isso, devem ser analisados e pesquisados por especialistas do setor com tempo de maturação controlado. O tema relacionado à modernização das salas de controle difere dos demais mencionados por ser diretamente ligado à automação do ambiente dos centros de operação (ver Gráfico 67).

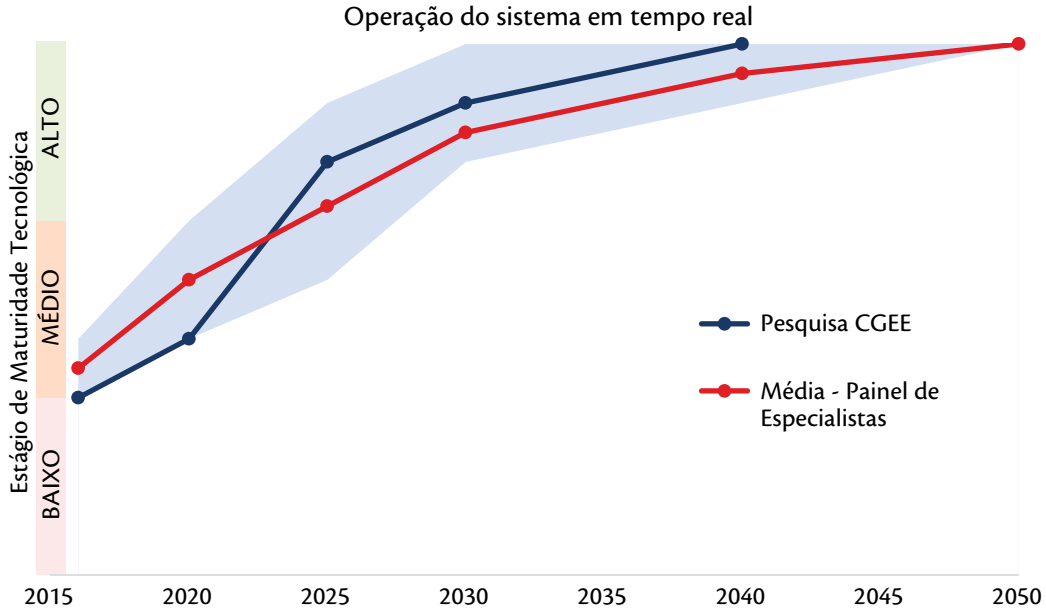

Gráfico 67 - Evolução da maturidade da operação do sistema em tempo real

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Monitoramento e avaliação dos efeitos de harmônicos no sistema elétrico

Avaliar as influências e as consequências dos harmônicos nos sistemas requer um grande esforço na área de estudos elétricos, análises, engenharia aplicada e testes, consumindo muitas horas para a elaboração e a validação de procedimentos e para o desenvolvimento de aplicativos devidamente comprovados de apoio à decisão em tempo real, com longo tempo de maturação para a conclusão do tema (ver Gráfico 68).

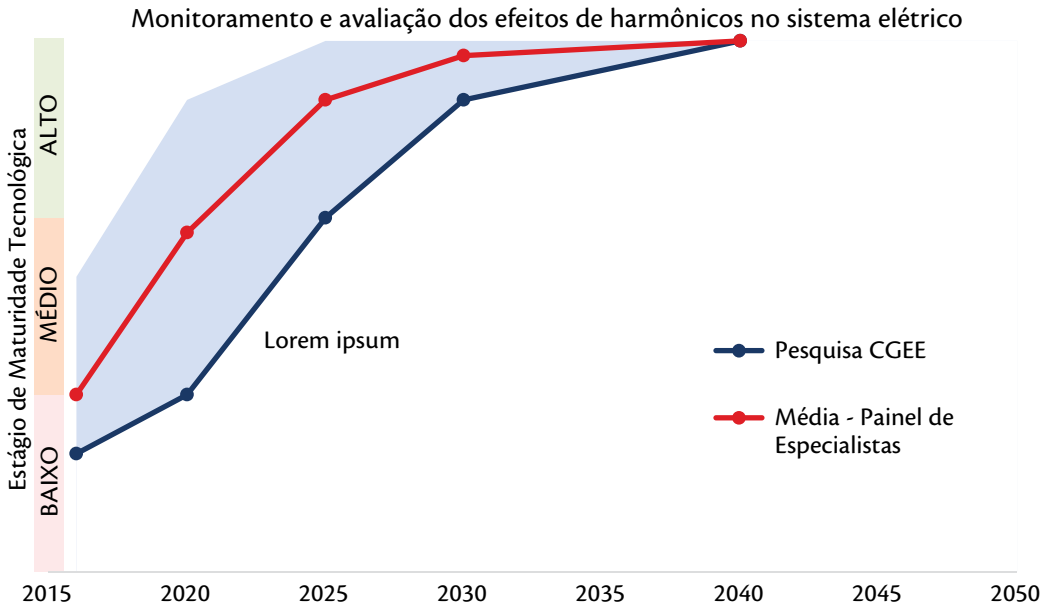

Gráfico 68 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Monitoramento e Avaliação dos Efeitos Harmônicos no Sistema Elétrico

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas PMU na Operação, Operação em Tempo Real e Monitoramento e Avaliação dos Efeitos de Harmônicos no Sistema Elétrico

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Operação do Sistema	PMU na operação	Fatores portadores de futuro	Levantamento de dados e desenvolvimento de indicadores		Estudo e reanálise de dados considerados relevantes Sistemas especiais avaliados e comprovados em laboratórios de simulação antes de sua aplicação	Implantação de nova tecnologia de obtenção de dados mais precisos a serem aplicados nas ações sistêmicas	Redução no tempo de indisponibilidade	
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
	Operação em tempo real	Fatores portadores de futuro	Incremento de ferramentas de apoio às ações operativas para reduzir incertezas		Melhoria nas simulações e análises dinâmicas de situações do sistema em tempo real		Sistemas especialistas com alta utilização do estado da arte em interface homem máquina (IHM) nos Sistemas de Supervisão e Controle (SSC) dos Centros de Operação de Sistemas Elétricos	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	Monitoramento e Avaliação dos Efeitos de Harmônicos no Sistema Elétrico	Fatores portadores de futuro	Aquisição de dados e desenvolvimento de indicadores		Estudos elétricos, análises, engenharia aplicada e testes e validação de procedimentos e desenvolvimento de aplicativos		Identificação de novas influências e consequências de fenômenos que afetam o SIN	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Monitoramento e análise de dados meteorológicos para apoio à operação do sistema

Tratam-se de temas ligados às informações meteorológicas nas diversas regiões onde as linhas e instalações estão operando. A maior dificuldade é justamente obter esses dados e a sua confiabilidade. Assim, deve-se prever um longo tempo inicial que corresponde à instalação de sensores, aguardar a ocorrência de eventos representativos, coletar esses dados e analisá-los para a posterior aplicação. Este processo deverá se repetir para atender o maior número possível de regiões a serem analisadas, aumentando o tempo inicial da pesquisa. A preparação dos modelos e de *software* deverá ser realizada por pessoal especializado do setor, com participação da iniciativa privada (ver Gráfico 69).

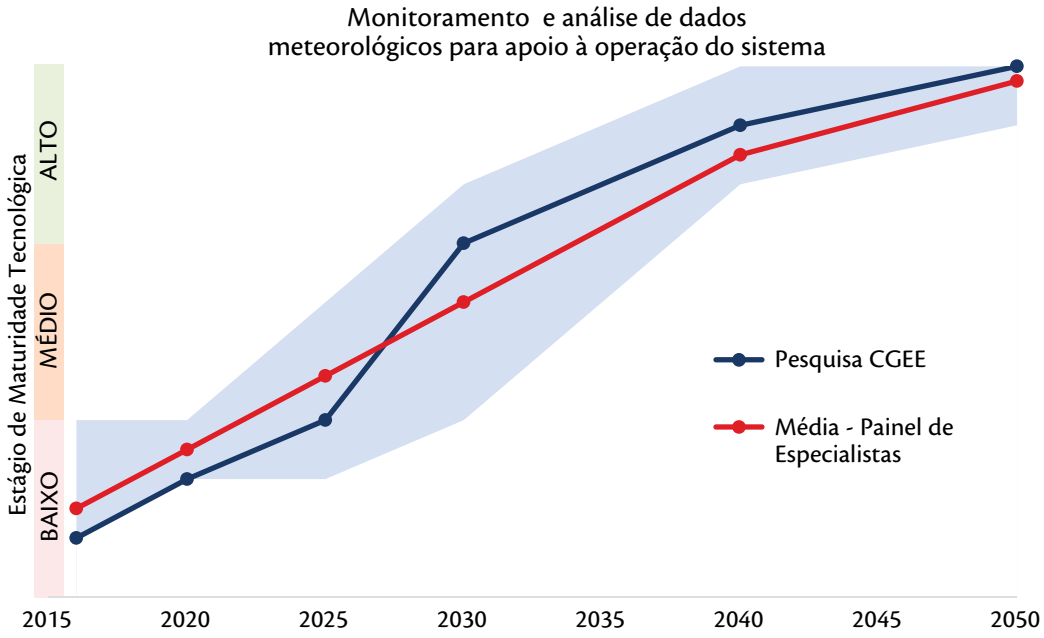

Gráfico 69 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Monitoramento e Análise de Dados Meteorológicos para Apoio à Operação do Sistema

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Sistemas especialistas de apoio à decisão operativa em tempo real

Os temas desta rota são relacionados à utilização do estado da arte em interface homem máquina (IHM) nos sistemas de supervisão e controle dos centros de operação, visando dar apoio na decisão em tempo real para a operação do sistema. O desenvolvimento de sistemas especialista tem normalmente um longo tempo de maturação (ver Gráfico 70).

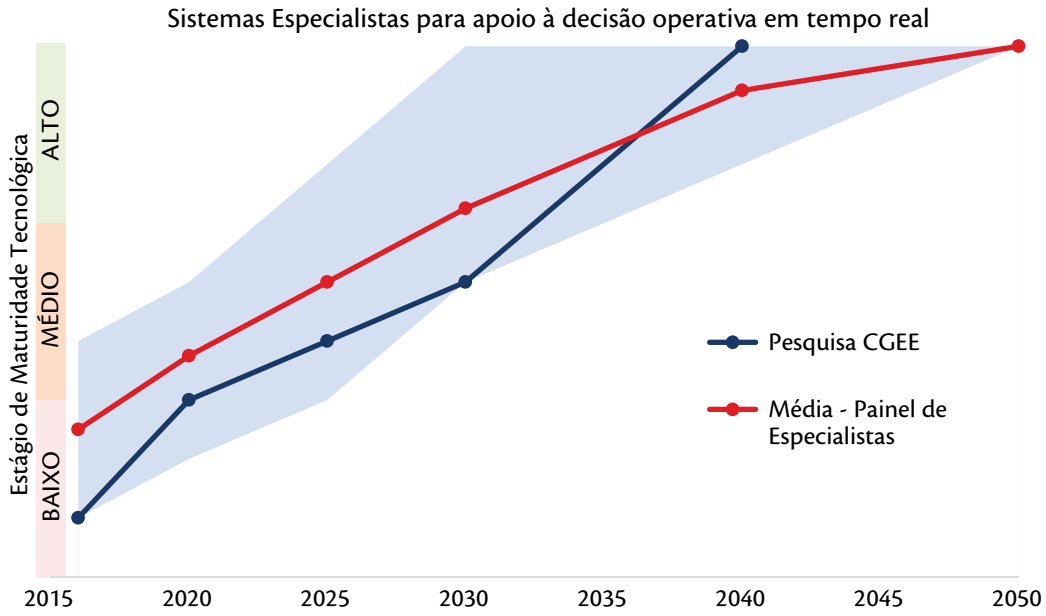

Gráfico 70 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas Especialistas para Apoio à Decisão Operativa em Tempo Real

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 43.

Tabela 43 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Monitoramento e Análise de Dados Metrológicos para Apoio à Operação do Sistema e Sistemas Especialistas de Apoio à Decisão Operativa em Tempo Real

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Operação do Sistema	Monitoramento e Análise de Dados Metrológicos para Apoio à Operação do Sistema	Fatores portadores de futuro	Entendimento dos fenômenos meteorológicos que podem afetar o sistema		Levantamento e identificação de casos típicos	Adequação dos equipamentos para o monitoramento nas diversas regiões geográficas	Informações adequadas de metrologia para auxiliar as decisões em tempo real	
		Maturidade	BAIXO			MÉDIO	ALTO	
	Sistemas Especialistas de Apoio à Decisão Operativa em Tempo Real	Fatores portadores de futuro	Definições de padrões para tomadas de decisão		Atualização dos sistemas de supervisão e controle dos centros de operação		Incremento das informações operativas de modo contínuo e com metodologias atualizadas	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Técnicas para a recomposição do sistema

A avaliação de técnicas ligadas à recomposição autônoma e assistida aplicadas à operação do sistema é tema existente atualmente no SIN de forma ainda muito embrionária, porém há um grande potencial a ser desenvolvido. Pela importância do tema e da tecnologia desenvolvida, espera-se que sejam largamente testadas em laboratório experimental em ambiente simulado e colocadas em prática por longo período, ainda em fase experimental. Na configuração final, a solução completa e concluída deve ser apresentada ao setor para ampla discussão e contestação. Por todos esses motivos, espera-se uma longa jornada para a conclusão desses temas e uma constante reavaliação do seu desempenho operativo (ver Gráfico 71).

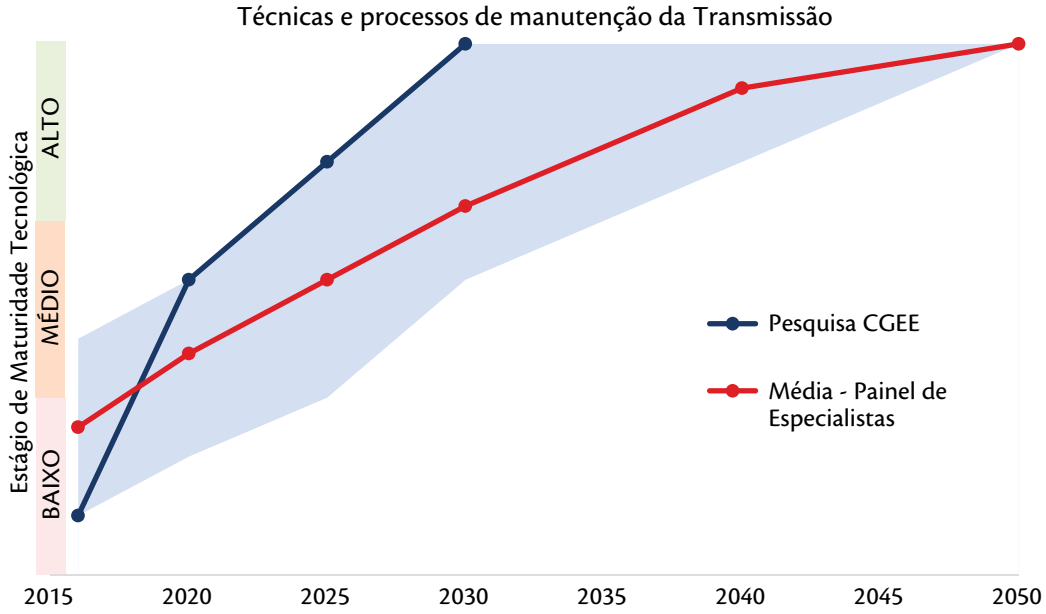

Gráfico 71 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Técnicas e Processos de Manutenção da Transmissão

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Segurança elétrica do sistema

Os temas estão relacionados ao aprimoramento das técnicas e também dos dispositivos de segurança. Para isso, será necessário reservar um longo tempo para testar os protótipos em laboratórios criados para avaliar a viabilidade do conceito e em ambiente operacional simulado nas instalações para colocar em prática o anteprojeto, além dos computados para a análise e para a engenharia aplicada. Outro tema relativo a essa macrotemática refere-se à criação de critérios para a teleassistência de

subestações, que devem ser amplamente discutidos com os operadores do sistema antes de sua conclusão (ver Gráfico 72).

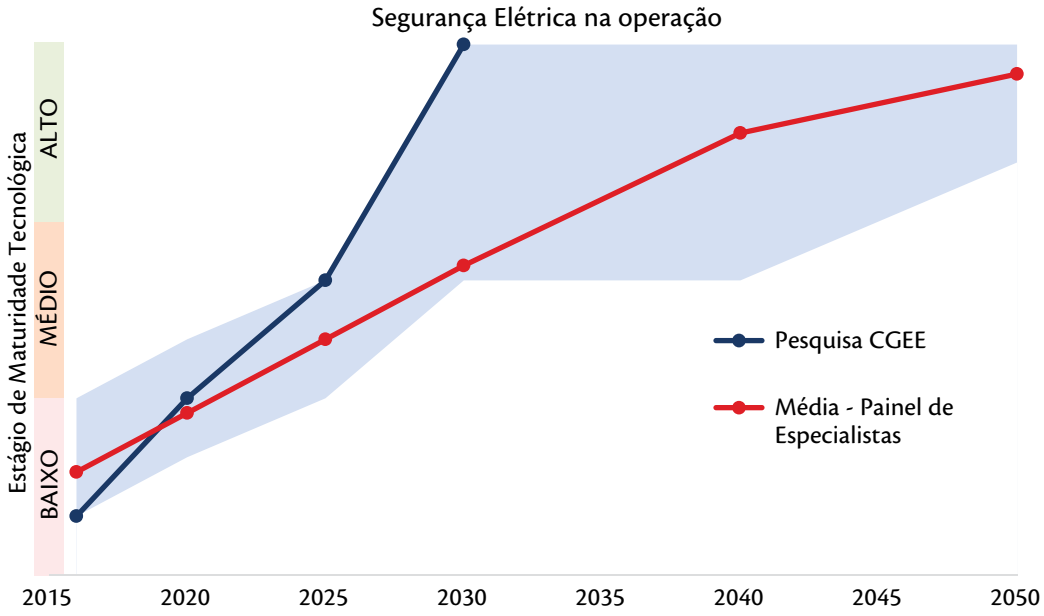

Gráfico 72 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Segurança Elétrica na Operação

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na Tabela 44.

Tabela 44 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Técnicas para a Recomposição do Sistema e Segurança Elétrica na Operação

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Operação do Sistema	Técnicas para a Recomposição do Sistemas	Fatores portadores de futuro	Levantamento de base de dados, no que tange à recomposição do sistema		Otimização e estabelecimento dos métodos de recomposição autônoma e assistida		Desenvolvimento contínuo, com adaptação às novas tecnologias	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			
	Segurança Elétrica na Operação	Fatores portadores de futuro	Definição de critérios para a teleassistência de subestações		Controle de qualidade contínua, no tocante à segurança de operação do sistema, com a identificação de critérios e o aprimoramento de técnicas e dispositivos de segurança			
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

9.3.2. Temática manutenção na transmissão

A engenharia de manutenção é continuamente desafiada a introduzir conceitos de manutenção para atender as novas tecnologias, escolher entre a implementação de procedimentos para estender o tempo de vida útil de instalações, atualizar projetos de equipamentos para aumentar a vida remanescente e substituir totalmente ou parcialmente sistemas e componentes (principalmente na área de automação, proteção, controle e telecomunicações) com tecnologia desatualizada e não mais disponível no mercado. O objetivo é manter a robustez e o efetivo valor da infraestrutura das instalações com confiável desempenho e otimizar o gerenciamento dos ativos. Estas ações devem levar em consideração a segurança dos trabalhos, a qualidade do serviço e os custos operacionais previamente negociados e posteriormente definidos com o gestor.

Roadmap tecnológico

A perspectiva de em um futuro próximo as áreas de O&M terem que operar e manter instalações de transmissão cada vez mais autônomas (subestações inteligentes) e desassistidas leva à premência de investimentos tecnológicos nos temas de monitoramento e visualização *online* de subestações.

Para atender a essa demanda, linhas de P&D foram direcionadas não apenas na procura de novos sensores para monitoramento de parâmetros de sistemas, instalações e equipamentos, como também na modernização e adaptação de *software*s inteligentes de análises e diagnóstico desses parâmetros para dar integral suporte à Engenharia de Manutenção na tomada de decisão, a distância, do real desempenho dos equipamentos e sistemas e melhor avaliar os riscos envolvidos.

A avaliação e a validação de novas e seletivas metodologias de manutenção são necessárias para o gerenciamento de risco, para a otimização dos serviços e para a redução de custos operacionais, agregando na flexibilidade das instalações e garantindo a qualidade do serviço ofertado.

Assim, técnicas e procedimentos de manutenção devem ser revisados e incrementados, com foco na execução dos serviços, cada vez mais sem a necessidade de desligamento das instalações, sendo prioritariamente executados a distância ou por meio de instrumentos, ferramentas e veículos que constantemente devem ser avaliados e atualizados segundo o estado da arte.

Nas técnicas de serviços de "linha viva", muito empregada atualmente em linha de transmissão e que vem sendo desenvolvida para o uso em subestações, foram recomendadas a constante atualização e a modernização dos métodos e processos com a utilização de materiais, componentes e inovações tecnológicas rapidamente desenvolvidos e oferecidos no mercado. Também devem ser consideradas no estudo as linhas de transmissão especiais, aquelas projetadas para as áreas de difícil acesso, em densas florestas, grandes rios, áreas poluídas etc.

Soluções inovadoras foram propostas como a adequação do emprego de *drones* e robótica em manutenção de linhas de transmissão de difícil acesso e em locais inseguros e contaminados. Também foi recomendado o desenvolvimento de métodos e de processos para a utilização em emergência de "partes de subestações móveis" em subestações de transmissão onde as soluções tradicionais são de longo tempo de maturação e de reparos prolongados.

Devido à diversidade do clima no País, foram propostas medições, análises e estudos sobre a interferência do clima no desempenho de equipamentos em áreas típicas como a Amazônia, em locais de alta concentração de umidade e poluição.

Vários podem ser o destino a ser dado para os componentes (equipamento, sistemas etc.) das instalações que completaram o seu ciclo de vida útil, como o "decomissionamento", que direciona o entendimento para uma desmontagem mais cuidadosa e técnica para colocar o ativo à disposição, isto é, com o intuito de preservá-lo após o uso. Já o termo "desmobilização" pode dar interpretação mais econômica; ou "desativação", que pode ser interpretado no sentido de um "sucateamento". Muito se discute sobre o que fazer para atender às exigências da legislação vigente. Linhas de P&D foram também selecionadas para analisar, atender e dar suporte a essa realidade.

Rota - Técnica e processos de manutenção de transmissão

Os temas das linhas de P&D desta rota são, com algumas exceções, conhecidos no setor. Assim, a finalidade da introdução desses temas está relacionada ao seu aprofundamento técnico, à atualização no estado da arte, à adaptação a cada região do País e às características do SIN. Existirá a necessidade de realização de comprovação técnica em laboratórios especializados e no campo onde estão as instalações, o que implica aumento do tempo de conclusão de alguns temas dessas linhas.

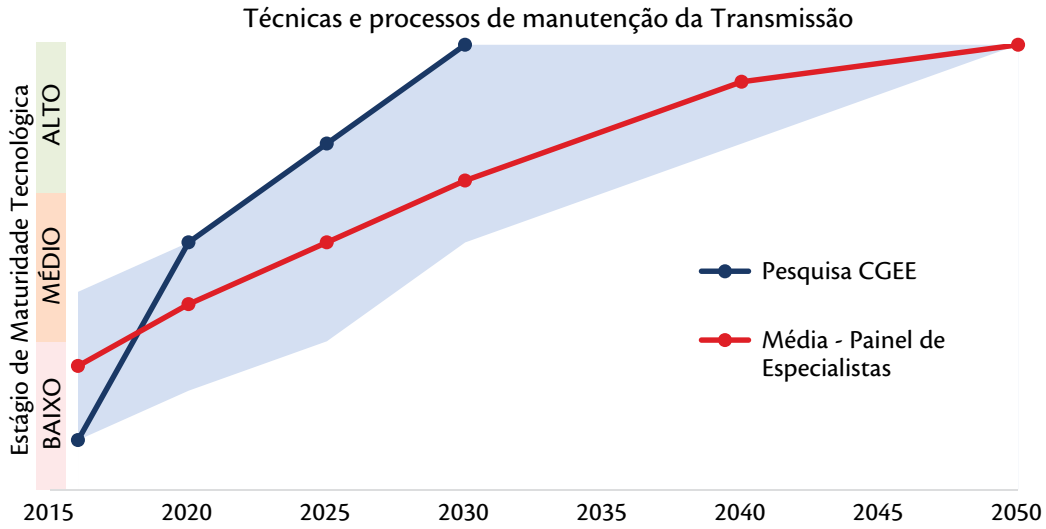

Gráfico 73 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Técnicas e Processos de Manutenção da Transmissão

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Avaliação de Ativos

Na rota Avaliação de Ativos, existem temas relacionados ao envelhecimento de equipamentos e instalações que requerem maior maturação na análise de dados e de resultados. Também implicam avaliação contínua de resultados. Já existe no país e no exterior desenvolvimento semelhante para alguns temas desta rota, porém é importante que se obtenha um desenvolvimento direcionado para a realidade das instalações do sistema brasileiro. Também há a necessidade de uso de laboratório especializado, de comprovações em testes de campo, de elaboração, construção e realização de ensaios em condições reais de protótipos, em vários momentos do desenvolvimento, e reanálises baseadas nas respostas dos resultados, o que implica aumento no tempo de conclusão da pesquisa.

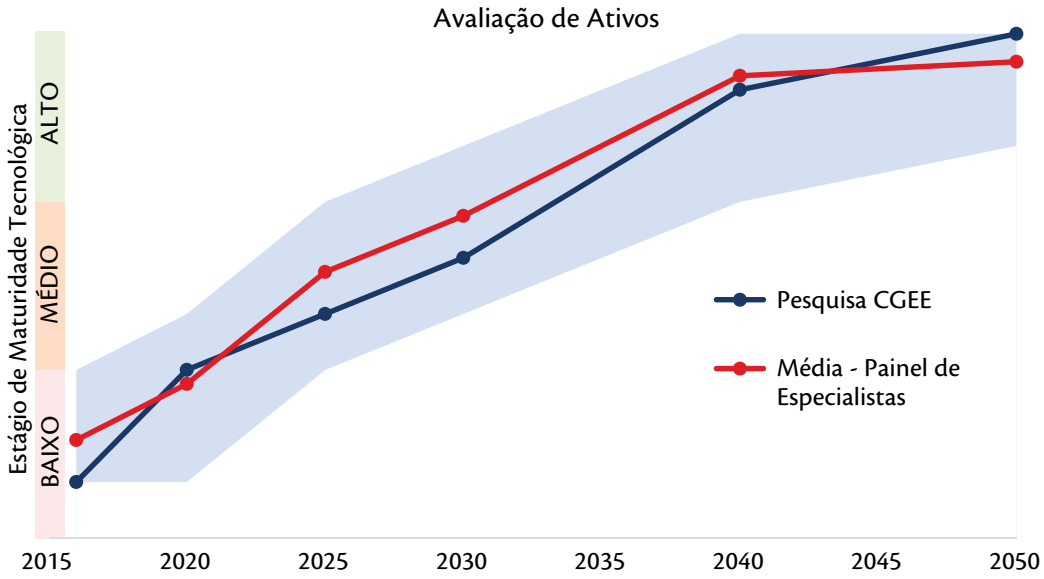

Gráfico 74 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Avaliação de Ativos

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Monitoramento do sistema de transmissão

Esta área de pesquisa está sendo muito valorizada atualmente pela necessidade de se obter informações cada vez mais rápidas e precisas das instalações, por isso, muitos países estão investindo em tecnologias para serem aplicadas nesse campo. O trabalho de desenvolver esses monitoramentos está na capacidade de atualizar os sensores existentes e de comprovar a eficiência de seus resultados

na prática, na realidade do SIN, além de desenvolver sistemas inteligentes de interpretação dos resultados. O tempo de maturação das etapas de desenvolvimento e de aprimoramento é grande e variável, de acordo com o local, com a instalação a ser monitorada e com os resultados dos testes realizados ao longo do processo de análise e conclusão.

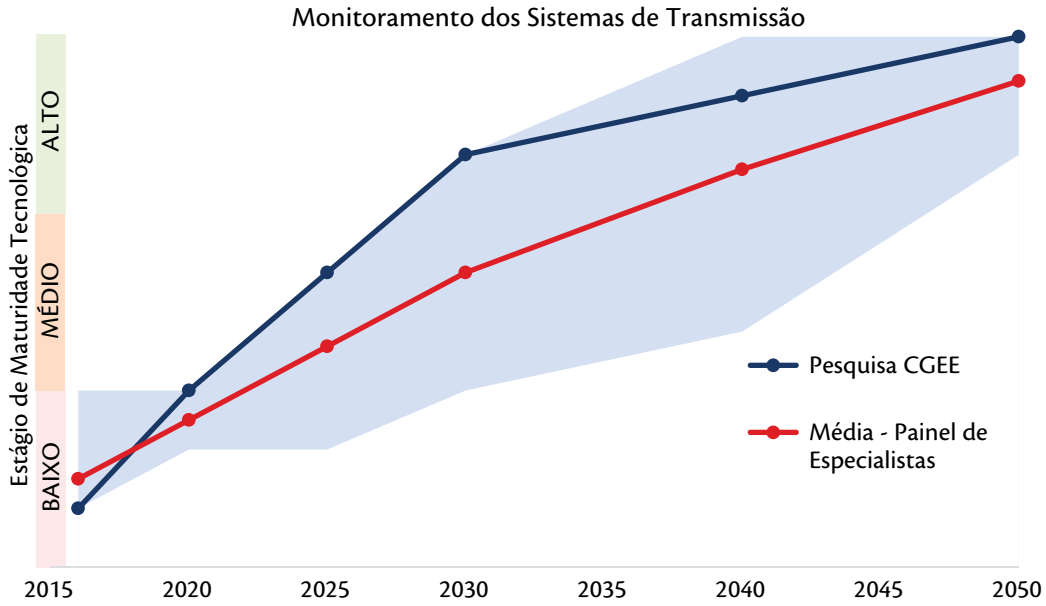

Gráfico 75 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Monitoramento dos Sistemas de Transmissão

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas tecnológicas são apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Técnicas e Processos de Manutenção da Transmissão, Avaliação de Ativos e Monitoramento dos Sistemas de Transmissão

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Manutenção na Transmissão	Técnicas e Processos de Manutenção da Transmissão	Fatores portadores de futuro	Adaptação dos métodos conforme a região do País e as características do SIN		Processos para a manutenção preventiva, preditiva e corretiva, objetivando a redução das indisponibilidade e dos riscos operativos		Uso de robótica para automatizar condições de diagnóstico em sistemas e equipamentos	
		Maturidade	MÉDIO		ALTO			
	Avaliação de Ativos	Fatores portadores de futuro	Estudos direcionados para a identificação de parâmetros que afetam diretamente a vida útil de equipamentos		Analisar e introduzir conceitos atualizados de desempenho de instalações, implementar procedimentos para estender a vida útil e atualizar projetos de equipamentos e sistemas para aumentar a vida remanescente		Integração de processos de análise de desempenho de instalações	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Monitoramento dos Sistemas de Transmissão	Fatores portadores de futuro	Sensores apropriados para a aquisição de dados		Sistemas inteligentes para interpretação e auxílio à tomada de decisão a partir dos dados adquiridos via equipamentos monitorados		Adequação dos sistemas a cada novo ambiente	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

9.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), 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 46.

Tabela 46 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Operação e Manutenção dos Sistemas de Transmissão

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Operação do sistema em tempo real	Operação do Sistema
2	Monitoramento do sistema de transmissão	Manutenção na Transmissão
3	Phasor Measurement Unit (PMU) na operação	Operação do Sistema
4	Sistemas especialistas para apoio à decisão operativa em tempo real	Operação do Sistema
5	Técnicas e processos de manutenção na transmissão	Manutenção na Transmissão
6	Avaliação de ativos em operação	Manutenção na Transmissão
7	Segurança elétrica na operação	Operação do Sistema
8	Monitoramento e análise de dados meteorológicos para apoio à operação do sistema	Operação do Sistema
9	Técnicas para recomposição do sistema	Operação do Sistema
10	Monitoramento e avaliação da influência de harmônicos no sistema elétrico	Operação do Sistema

Fonte: Elaboração própria.

Todos os temas das rotas da macrotemática são considerados muito importantes para o desenvolvimento da Operação e Manutenção do Sistema de Transmissão Brasileiro. Contudo foi realizada uma ampla análise para priorizar as rotas tecnológicas de acordo com a importância que o tema representa em relação aos demais apresentados. A rota considerada a mais importante dentre as mencionadas foi a referente à operação do sistema em tempo real, pois esta engloba as linhas de P&D que representam os resultados de todos os esforços a serem realizados no desenvolvimento de ferramentas e estudos sistêmicos previstos; e também foi considerada a de maior importância para suportar as exigências operativas esperadas nas próximas décadas. Em seguida, o monitoramento dos sistemas e equipamentos

pela sua capacidade de captar, transmitir e analisar as informações em tempo real, dando, tanto para a operação quanto para a manutenção, subsídios para tomadas de decisões mais consistentes. Da mesma forma, os sistemas especialistas de apoio à decisão baseados em dados de PMU foram considerados importantes pela precisão esperada dos seus resultados. Seguindo no mesmo princípio de melhor conhecer as condições sistêmicas e aplicar os resultados obtidos nas decisões em tempo real, foi escolhida a rota tecnológica que visa desenvolver e avaliar os sistemas especialistas para apoiar a decisão da operação.

Técnicas e processos de manutenção devem ser constantemente avaliados, aprimorados, consolidados e aplicados pelas empresas do setor. A participação de um número cada vez maior de empresas nas atividades de transmissão no Brasil, influenciadas pela liberação do setor, exigirá um grande desenvolvimento na área de manutenção, objetivando a redução das indisponibilidades, dos riscos envolvidos e dos custos relacionados. Esta foi uma das principais razões da escolha desta rota como a quinta mais importante. Em seguida, a rota avaliação de ativos foi também valorizada, devido principalmente ao esperado envelhecimento dos ativos em operação no SIN, em que devem ser analisados temas como as ações para estimar e controlar a vida remanescente de instalações e equipamentos. O aprimoramento de técnicas e dos dispositivos de segurança elétrica aplicados à operação foi valorizado, e também a utilização em maior escala de dados meteorológicos relevantes para apoio à operação. Por último, e ainda consideradas muito importantes, as técnicas de recomposição autônomas e assistidas das instalações e dos sistemas e a avaliação das influências e consequências de harmônicos no ambiente do SIN.

Capítulo 10

Capítulo 10

Macrotemática Proteção, Automação e Controle do Sistema de Transmissão

A macrotemática Proteção, Automação e Controle (PAC) da Transmissão apresenta proposições destinadas a viabilizar e estimular o avanço dos sistemas de transmissão por meio de dispositivos de PAC digitais numéricos concebidos no Brasil. Todos os dispositivos e funções mencionados neste documento são fabricados ou vislumbrados pelos fabricantes multinacionais.

As temáticas aqui propostas cobrem uma ampla gama de recursos técnicos e tecnológicos, a ponto de ser equivalente a todos os produtos de PAC em serviço no SIN. As rotas em que se subdividem as temáticas não somente viabilizam a implementação de dispositivos e funções de PAC como produtos, mas principalmente possibilitam as implantações de esquemas e sistemas constituídos por esses produtos, como proteção, automação e controle adaptativos, *System Integrity Protection Schemes* (Sips - esquemas de proteção da integridade do sistema elétrico, em português), *Wide Area Monitoring, Protection, Automation and Control Schemes* (Wampacs - esquemas de monitoramento, proteção, automação e controle em área ampla, em português), baseados em Medição Sincrofasorial, além de toda sorte de *softwares* para engenharia de aplicação de PAC. Destacam-se os instrumentos de teste, que permitem aferir o desempenho e os requisitos de qualidade dos demais dispositivos e funções aqui abordados.

Ressalte-se que, no contexto deste projeto, os dispositivos e funções necessários para os Sistemas de Subtransmissão das Distribuidoras são abordados na macrotemática PAC da Transmissão. Assim, no grupo temático de distribuição serão considerados os dispositivos e as funções para barramentos de até 13, 8 kV (ALTUVE, 2010), conforme indicado na Figura 1:

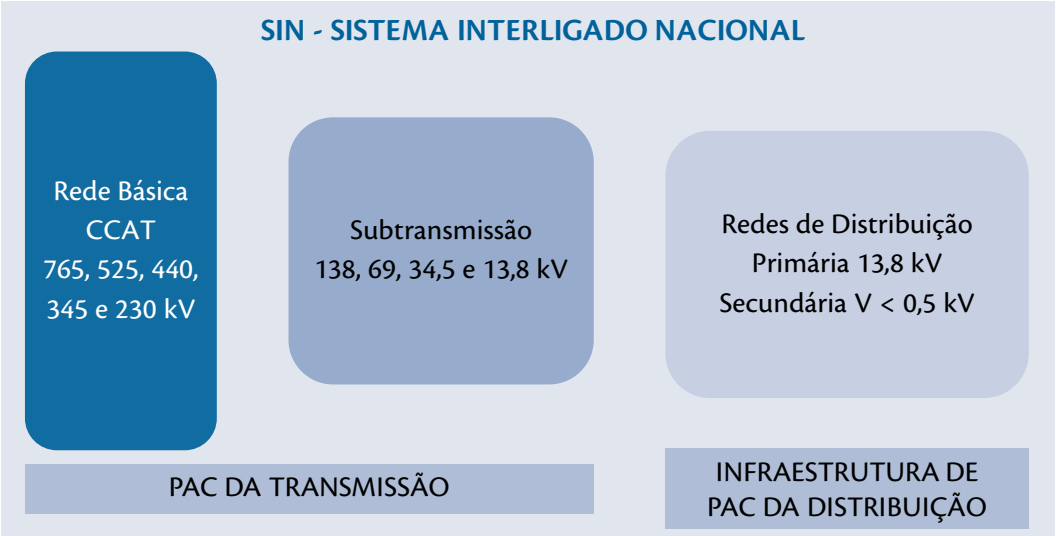

Figura 1 - Esquema de Abrangência de PAC da Transmissão

Fonte: Elaboração própria.

A macrotemática PAC da Transmissão foi concebida como um conjunto harmônico de cinco temáticas focadas nos modernos Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica. Para tanto, a implementação dos dispositivos e funções de PAC da Transmissão depende de investimento em PD&I no tocante aos temas a seguir.

Uma coletânea de funções e dispositivos de PAC na forma de Intelligent Electronic Devices (IEDs) constitui a base desta macrotemática em termos de principais esforços de PD&I. Tais IEDs são dedicados aos componentes do sistema elétrico cuja construção ou fabricação não estão técnica e comercialmente associadas a nenhum dispositivo do gênero, a saber: Linhas de Transmissão, Barramentos, Transformadores, Reatores Shunt e Série e Bancos de Capacitores Shunt (conectados em derivação).

Para viabilizar análises de perturbações qualitativa e quantitativamente acuradas, são propostos Registradores Digitais de Perturbações (RDPs) e PMUs. Os registros oriundos de RDPs e de Sistemas de Medição Sincrofasorial (SMS) podem ser tratados por *softwares* especializados em análise de faltas e em análise de perturbações. Os SMS utilizam concentradores de sincrofasores no nível de subestação e superconcentradores no nível de Centro de Operação. Acresce que os SMS são o cerne dos Wampacs.

Os recursos de comunicação intrassubestação são contemplados conforme o preconizado na Norma IEC 61850, na qual estão tratados os barramentos óticos de estação e de processo. Neste âmbito, são inerentemente abordadas as *Merging Units* (MUs).

Para fazer uso otimizado do conteúdo das temáticas supracitadas, há o tema de desenvolvimento de *softwares* para aplicações de PAC. São considerados os *softwares* de Proteção Unitária Remota, os de Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência e os de aplicação propriamente dita, que cobrem desde a parametrização de IEDs até os algoritmos de resolução ultrarrápida de instabilidades angular e de tensão, acrescidos de modelos fasoriais dinâmicos de proteção, Sips e Wampacs.

O quinto tema constituinte desta macrotemática cobre os instrumentos para testes primários e secundários de sistemas de PAC. Os instrumentos podem ser aglutinados como equipamentos de testes para PAC, podendo incluir características de instrumentação virtual que atendam à norma IEC 61850/61869 e que integrem testes de equipamentos primários e secundários, e também como ferramentas para sistemas de testes em tempo real.

A Figura 2 ilustra as cinco temáticas que constituem a Proteção, a Automação e o Controle dos Sistemas de Transmissão.

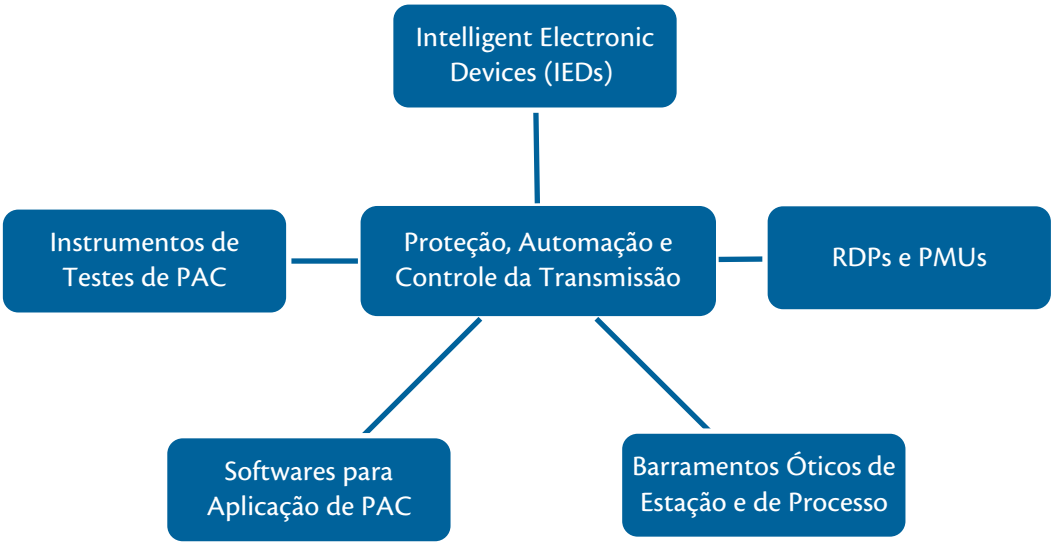

Figura 2 - Temáticas de Proteção, Automação e Controle (PAC) da Transmissão

Fonte: Elaboração própria.

10.1. Visão de futuro

10.1.1. 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 conduz naturalmente à ampliação do sistema de transmissão, mas acima de tudo implica operar o SIN em condições cada vez mais próximas de seus limites. Isto significa a necessidade de prover dispositivos e sistemas de PAC para os novos componentes da transmissão e de substituir todos aqueles vinculados aos componentes em serviço no SIN, mas que não sejam capazes de atender aos novos e mais específicos requisitos demandados por condições operativas mais rígidas (MACKEY, 2010; ADAMIAK, 2015).

Acresce que a evolução da Distribuição também trará desafios para a Transmissão, visto que as exigências de qualidade de energia serão cada vez mais severas para comportar eficientemente as grandes inovações conceituadas como *Smart Grids*, Microgrids, Geração Distribuída, Armazenamento de Energia e Veículos Elétricos (JANSSEN, 2010).

Trata-se, portanto, de uma oportunidade quase que inédita de ampliar e modernizar a Infraestrutura de PAC da Transmissão, a ponto de sinalizar que o Brasil deve avançar no sentido de pesquisar, desenvolver e produzir dispositivos e sistemas de PAC, beneficiando-se da movimentação que ocorrerá no respectivo mercado. Para tanto, deve-se considerar com carinho a incubação de empresas nacionais embasadas por tecnologia nacional com capacidade de entrar vigorosamente no mercado internacional de PAC para a Geração, a Transmissão e a Distribuição, tendo em mente que este documento trata exclusivamente da Transmissão.

O momento de lançar mãos à obra é agora, de sorte a usufruir dos benefícios econômicos e financeiros da previsão de PIB crescente até 2030. O fomento a PD&I sobre PAC para o Sistema de Transmissão deve cobrir principalmente os dispositivos e as funções mais aplicados (JALTUVE, 2010) para obter economia de escala. A perspectiva de produzir no Brasil os dispositivos e os sistemas necessários à ampliação vislumbrada para o SIN é tecnicamente muito atraente em função da capacitação em PAC que já se atingiu no País.

10.1.2. Objetivo geral

O foco principal dos investimentos em PD&I para esta macrotemática é atingir o domínio tecnológico do IEDs e de demais dispositivos baseados em *hardware* de prateleira para atender às exigências

presentes e futuras do SIN. Isto também se aplica ao domínio tecnológico dos respectivos dispositivos portáteis de testes e dos *software*s tipicamente empregados nas aplicações de PAC em Sistemas de Transmissão.

10.1.3. Objetivo específico

Para suportar o objetivo geral, as tecnologias devem ser estudadas e acompanhadas visando à sua implantação a curto, médio e longo prazo. Deve-se seguir o rumo destinado a uma maior integração, otimização de redundâncias e identificação de dispositivos e sistemas cada vez mais sintonizados com os avanços dos grandes Sistemas de Transmissão.

Curto prazo (2017-2020):

Em curto prazo, ou seja, de 2017 a 2020, o objetivo a ser alcançado com o desenvolvimento dos estudos de P&D é:

- Modelos das funções de proteção de linha, de localização de falta, de proteções sistêmicas e de novas proteções sistêmicas vinculadas às LTs;
- Modelos das funções de proteção de transformador;
- Protótipos das funções de medição e controle;
- Modelos das funções de automação;
- Protótipos de registrador digital de perturbações e unidade de medição sincrofasorial integrados ao IED e *stand alone*;
- Modelos de barramentos óticos de estação - IEC 61850;
- Protótipo de proteção unitária remota;
- Algoritmos para as funções de proteção dos componentes selecionados;
- Protótipos dos demais *software*s de PAC;
- Modelos dos instrumentos de testes compactos, ligados à Norma IEC 61850 e capazes de gerar transitórios.

Médio prazo (2020-2030):

Em médio prazo, ou seja, de 2020 a 2030, será necessário o desenvolvimento de PD&I a fim de permitir uma evolução para atingir os seguintes objetivos:

- Protótipos das funções de proteção dos componentes selecionados;
- Protótipos das funções de medição, controle e automação;
- Novos protótipos de registrador digital de perturbações e unidade de medição sincrofasorial integrados ao IED e *stand alone*;
- Protótipos de barramentos óticos de estação e de processo - IEC 61850 (com eventual evolução tecnológica);
- Novo protótipo de proteção unitária remota;
- Novos algoritmos para as funções de proteção dos componentes selecionados;
- Novos protótipos dos demais *software*s de PAC;
- Protótipos dos instrumentos de testes compactos, ligados à Norma IEC 61850, virtuais e capazes de gerar transitórios;
- Modelo dos instrumentos de testes para tempo real.

Longo prazo (2030-2050):

Em longo prazo, ou seja, entre 2030 e 2050, os objetivos específicos são:

- Funções de proteção dos componentes selecionados;
- Funções de medição, controle e automação;
- Registrador digital de perturbações e unidade de medição sincrofasorial integrados ao IED e *stand alone*;
- Barramentos óticos de estação e de processo - IEC 61850;
- *Software*s para a aplicação de PAC;
- Instrumentos para testes primários e secundários de sistemas de PAC

10.1.4. Fundamentação

Para que o Brasil participe ainda mais intensamente da evolução do SIN, adentrando pelo cerne de meios de provisão de Segurança Operativa que otimizem o seu desempenho e que conduzam a uma melhoria global da Qualidade de Energia (PRODIST, 2017), a expectativa consiste no fomento de PD&I no tocante à Proteção, Automação e Controle (PAC) de grandes Sistemas de Transmissão (MACKEY, 2010; ADAMIAK, 2015). Isto significa modernizar e persistir na inovação dos meios descritos na Figura 3, na qual pode ser visualizado que Segurança Operativa (elétrica) e Qualidade da Energia são conceitos abstratos que se materializam por meio dos recursos de PAC.

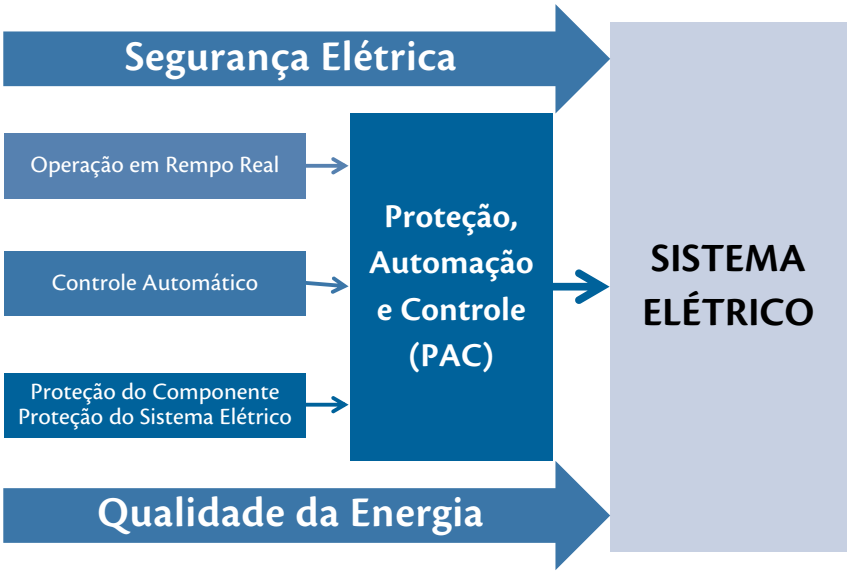

Figura 3 - Esquematização do Acesso de Segurança e Qualidade

Fonte: Elaboração própria.

O emprego de Proteções Unitárias (ou restritas) cada vez mais eficientes em adição às Proteções Gradativas (ou irrestritas) existentes (MASON, 1956) constitui o cerne do avanço possível em termos da eliminação rápida e seletiva de curtos-circuitos. A Operação em Tempo Real deve dispor de meios que aliviem os operadores de quaisquer tarefas que não a sua função precípua de alerta permanente do sistema elétrico sob sua responsabilidade (ORDACGI, 2011).

A expressão "componentes selecionados" mencionada acima aplica-se aos componentes mais comuns nos Sistemas de Transmissão, cuja aquisição não contempla necessariamente os dispositivos e sistemas

de PAC cabíveis em cada aplicação. São eles: Linhas de Transmissão, Barramentos, Transformadores, Reatores Shunt e Série e Bancos de Capacitores Shunt.

O avanço vislumbrado até 2050 está pavimentado pela integração das macrofunções de PAC nos IEDs (HENVILLE, 2014), sendo a Automação (BRAND, 2010) crucial para tanto. No que diz respeito à Macrofunção Proteção, o estado da arte está consolidado em Adamiak (2015). As questões referentes aos System Integrity Protection Schemes (SIPS) e a outros tópicos de Engenharia de Aplicação de PAC baseiam-se nas referências (ORDACGI, 2010).

As evoluções contempladas neste documento sobre a norma IEC 61850 e protocolos de comunicação amparam-se nas referências (BRUNNER, 2010), enquanto em Kunsman (2010) há respaldo sobre Segurança Cibernética e testes de dispositivos e sistemas digitais de PAC.

De agora até 2020 (ORDACGI, 2010), esta macrotemática dependerá exclusivamente de PD&I por intermédio dos Projetos de P&D da Aneel, culminando com a disponibilização de protótipos destinados a atrair o interesse da Cadeia Produtiva do Setor Elétrico, que terá o estímulo de usufruir da previsão de que a taxa de crescimento do PIB será crescente até meados de 2030. Neste contexto, é seguro estimar que os primeiros resultados serão atingidos antes de 2025. Justamente por esta conjunção positiva de fatores, estima-se que o objetivo geral desta macrotemática deverá ser alcançado no início da década de 2030. Com o impulso provido pelo Projeto de Prospecção Tecnológica no Setor de Energia Elétrica até 2030, a Cadeia Produtiva poderá colaborar diretamente do avanço em PAC da Transmissão.

A tônica desta macrotemática é viabilizar o intenso fomento a PD&I na área de PAC, visando criar protótipos de alta qualidade e baixo custo totalmente nacionais. Neste contexto, nunca é demais frisar que as Normas Internacionais de PAC e a Regulação da Transmissão (Procedimentos de Rede) deverão ser sempre estritamente atendidas.

10.2. Caracterização das métricas da macrotemática para o cenário futuro

Os itens a seguir apresentam o cenário geral desta macrotemática, considerando-se os aspectos: evolução tecnológica, estratégia setorial, questão socioambiental, produção de CT&I, estrutura de CT&I e indústria e mercado. O esquema resumido deste capítulo encontra-se no Anexo - Planilha de Indicadores.

Diante do crescimento da capacidade instalada do SIN, que parte dos atuais 152 GW (BIG, s.d.) e deve atingir um valor entre 400 GW e 480 GW em 2050, e do PIB até 2030, é fundamental avaliar que outros aspectos socioeconômicos afetam a Transmissão de Energia Elétrica no Brasil e repercutem diretamente na macrotemática Proteção, Automação e Controle (PAC) aqui proposta.

O PIB será crescente e modulado, significando então que evoluirá menos no final do período, até meados de 2030, com projeção de um crescimento médio em torno de 2,5% a.a. no período de 2017 e 2026 (EPE e MME). Os diferentes setores crescem a taxas distintas, havendo uma correspondência entre o grau de desenvolvimento da economia e a distribuição setorial (MME), implicando uma estabilidade qualitativa de uma Pirâmide de Consumidores (MAFRA, s.d.) que avança quantitativamente. A manutenção do perfil dos consumidores, mais do que o seu aumento numérico, não é um indicador de estabilidade técnica quanto à PAC da Transmissão, visto que a conscientização dos consumidores tende a se expandir no sentido de demandar maior qualidade no fornecimento e no tratamento igualitário no âmbito de sua faixa de consumo:

- Grandes consumidores devem compreender melhor a responsabilidade pelos defeitos internos a suas instalações, distinguindo-os dos problemas oriundos do SIN, para os quais apresentarão questionamentos sobre providências concretas para a melhoria da Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e da Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC).
- Idem para os pequenos consumidores, acrescentando-se que poderão compreender que fazem parte de esquemas de corte de cargas não prioritárias, vislumbrando que todos os consumidores de sua região devem ser igualmente onerados, em um sistema de rodízio de cargas.

Isto implica uma melhor escolha de funções de proteção e um avanço de esquemas de automação e controle no sentido de minimizar o corte temporário do fornecimento, mediante o aumento crescente da segurança operativa (elétrica) e da qualidade de energia.

A indústria nacional será mobilizada por um desenvolvimento tecnológico motivado pela demanda interna (desafios tecnológicos internos). Todavia, o País buscará ser competitivo internacionalmente. Um destes desafios internos consiste justamente em envolver a cadeia produtiva na evolução de PAC, estimulando a incubação de empresas deste ramo no País. A intenção de competir no mercado internacional leva à economia de escala, viabilizando novas empresas no ramo de PAC.

O cenário da rede de transmissão do futuro está começando a tomar forma. As Empresas de Transmissão precisam ser proativas e galgar os degraus para moldar a rede (a Rede Básica do SIN no Brasil), de

sorte a fazê-la atingir o que melhor satisfaça seus próprios requisitos. Para tanto, a comunidade de PAC deve agir no sentido de identificar quais as novas funções que serão agregadas à Rede Básica e de ter as ferramentas adequadas e as tecnologias disponíveis para promover a melhor integração da rede. Isto é mais fácil de enunciar do que de fazer, pois haverá desafios ao longo da marcha da rede para o futuro, uma vez que diversas tecnologias só foram objeto de aplicações experimentais e, portanto, temporárias (ADAMIAK, 2015).

Uma vez que os princípios e blocos construtivos para comunicações, como na norma IEC 61850, estejam disponíveis, os recursos de PAC poderão não estar e demandar investimento, particularmente nos níveis mais baixos de classe de tensão. Novas mudanças também são necessárias para prover a educação e o conhecimento necessários para os engenheiros da comunidade de PAC poderem dar conta dos avanços tecnológicos. Especificamente, novas habilidades já são demandadas com relação à engenharia de rede e de *software*, além da proficiência em gerenciamento e ferramentas, em adição às tradicionais engenharias elétrica e eletrônica (ADAMIAK, 2015).

O Sistema de Transmissão do futuro pode ser caracterizado por métricas que abordam Fatores Tecnológicos de Evolução descritos nos quatro tópicos resumidos a seguir (ADAMIAK, 2015). Neste contexto, as 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 (ver Anexo):

- Equipamentos como Facts e HVDC objetivam prover solução para alguns dos problemas encontrados nos Sistemas de Transmissão como a mitigação de consequências das faltas ou como o aumento dos limites de transmissão. Porém eles criam novos problemas de proteção e de automação que devem ser interfaceados com o sistema elétrico global.
- As comunicações terão papel ainda mais relevante, por sua capacidade de coletar informação com semântica padronizada originada em locais remotos do sistema elétrico para viabilizar decisões em tempo real baseadas no conhecimento acurado do estado da rede. Muitas das Subestações de Transmissão já têm acesso a recursos de comunicação adequados, no entanto Subestações de Distribuição e de Geração Distribuída só costumam dispor de recursos de comunicação bastante limitados. Isto traz desafios adicionais se for conveniente integrar tais subestações na forma necessária aos modernos Sistemas de Transmissão.
- A norma IEC 61850 terá um forte protagonismo nas soluções de PAC dos sistemas do futuro, especialmente pela habilidade de prover autodescrição e configuração genérica. Originalmente concebida para aplicações intrassubestação, a norma foi ampliada para cobrir comunicações entre subestações, entre subestações e entre subestações e Sistemas de Supervisão e Controle (SSCs = SCADA + EMS). Por meio dos Barramentos de Processo e das MUs, são facilmente obtidos os valores amostrados de tensão e corrente, viabilizando o

uso de transformadores para instrumentos não convencionais (*Non Conventional Instrument Transformers - NCIT).*

- Entre outros fatores de mudança, podem ser incluídos: armazenamento de energia, residências de energia zero, veículos elétricos, redes de residências, automação doméstica, tecnologias de nova geração de comunicações etc.

Em suma, a evolução tecnológica é o principal pilar de sustentação da macrotemática Proteção, Automação e Controle da Transmissão. Uma vez que a evolução internacional de PAC (estado da arte) vem se desenvolvendo em um ambiente praticamente sincronizado entre os fabricantes renomados, o período de hoje até 2020 é crítico para que a PD&I brasileira avance e assuma o mesmo ritmo. Dispondo-se dos protótipos em 2020 e com a cenarização empolgante descrita em 3.1 acima, é certo que até 2025 seja alcançado sucesso: modelos com conceitos validados em ambiente real de aplicação, de sorte a atingir na próxima década o objetivo geral do Projeto de Prospecção Tecnológica no âmbito de PAC da Transmissão. Contando com protótipos demonstrados em escala real de aplicação a partir de 2030, o sincronismo tecnológico mundial de PAC vai colocar o Brasil em condições altamente qualificadas em PD&I em meados do século XXI.

O aumento do nível de integração (PRODIST, 2017) deve ser acompanhado acuradamente, diante do seu alto grau de interferência em PD&I e na produção. Uma solução simples para fazer este acompanhamento é criar um grupo de trabalho no Comitê de Estudos B5 - Proteção e Automação do Cigré-Brasil para tratar do nível de integração. Entre outras vantagens, trabalhar no âmbito do Cigré-Brasil assegura a participação de todos os segmentos do SEB.

Participando da evolução das normas internacionais, o País obterá o balizamento necessário ao desenvolvimento de PD&I em PAC da Transmissão, passando pela produção e chegando aos detalhes da aplicação. A partir de 2025, se sugere que esta atividade passe a ser feita sob coordenação estratégica, cabendo então definir se o MME, a Aneel ou outra entidade ficará responsável pela coordenação.

O crescimento da aplicação de Geração Distribuída (GD) nas redes de distribuição caracteriza-se como o principal fator de modificação das características e requisitos de operação, proteção, automação e controle. No ambiente da Transmissão, basta haver um acompanhamento da inserção de GD a ponto de justificar alguma alteração na aplicação de PAC, ou se será necessário algum avanço em PD&I, o que é bem menos provável.

O parágrafo anterior é necessário, porém insuficiente para balizar as ações de PD&I, visto que a qualidade da energia tem influência inerente em PAC da Transmissão, com máxima ênfase em proteção. É esperada uma necessidade de requisitos mais exigentes na qualidade da energia, principalmente

da parte de consumidores mais sensíveis, e com o risco de perdas financeiras na sua produção. Por esta razão, as ações de PD&I devem partir das funções de proteção unitária com foco permanente em atender aos novos e mais estritos requisitos de qualidade da energia.

A influência mútua de PAC da Distribuição e da Geração sobre PAC da Transmissão é tão natural quanto notória, pois na essência a missão mais importante é detectar e eliminar seletiva e rapidamente as faltas em qualquer um destes três segmentos do sistema elétrico. O estímulo a PD&I deve ser equalizado em todos os segmentos, de modo que haja progresso equânime e que a duplicação de esforços seja evitada.

Os valiosos processos de Análise de Perturbações e de Estatística de Desligamentos Forçados de Componentes e de Desempenho da Proteção devem passar a ser certificados por Normas ISO, de maneira a ampliar o seu valor agregado.

A evolução dos Procedimentos de Rede de PAC e outros correlatos deverá ser feita em consonância com as ações de PD&I e será aferida e realimentada permanentemente pelos resultados da estatística de desempenho. Estas ações culminam por criar um círculo virtuoso de grande proveito para todos os segmentos do SEB.

Neste contexto, a formação de mão de obra só terá a ganhar se o ensino de PAC for modernizado, ligando-o à pesquisa, desenvolvimento, produção e aplicação de produtos. O ensino e a aferição dos seus resultados são inerentemente aferidos por meio do círculo virtuoso citado acima, permitindo uma busca permanente pela máxima profissionalização dos discentes que se envolverem com PAC após a conclusão de seus estudos para atingir a titulação adequada.

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. De uma forma geral, o desenvolvimento econômico, as novas tecnologias, parcerias entre entes da cadeia de CT&I, indústria e SEB potencializam a melhoria ou a participação dessas questões no SEB, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

10.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas

Neste capítulo, são abordadas as métricas de desenvolvimento e as curvas de evolução da maturidade tecnológica das rotas consideradas no projeto. Tais pontos são apresentados, por temática, nos itens subsequentes.

10.3.1. Temática desenvolvimento de Intelligent Electronic Devices (IEDS) para linhas de transmissão, barramentos, transformadores, reatores shunt e série e bancos de capacitores shunt

Rota - Desenvolvimento de funções de proteção

O acompanhamento do nível de integração crescente do *hardware* implica eventual necessidade de atualizar os protótipos em 2025. Há a perspectiva de quebra de paradigma no aumento do nível de integração, viabilizando processadores muito mais poderosos e rápidos que os atuais. Estima-se que isto deverá ocorrer entre 2030 e 2050, justificando reorientar a Rota de Funções de Proteção. O mesmo se aplica por analogia com a participação brasileira na evolução e na elaboração de normas internacionais.

O aumento da capacidade instalada de Geração Distribuída internamente às Redes de Distribuição deve ser seguido em termos mercadológicos e técnicos para reorientar o esforço de PD&I sobre Funções de Proteção. Uma vez que a redução do tempo de eliminação de faltas tem influência positiva direta na Qualidade de Energia, a observação técnica dos produtos oferecidos no mercado internacional de PAC também poderá otimizar o rumo da pesquisa sobre as funções de proteção e os meios de sua implementação. A caracterização do desenvolvimento da maturidade desta rota pode ser observada no Gráfico 76.

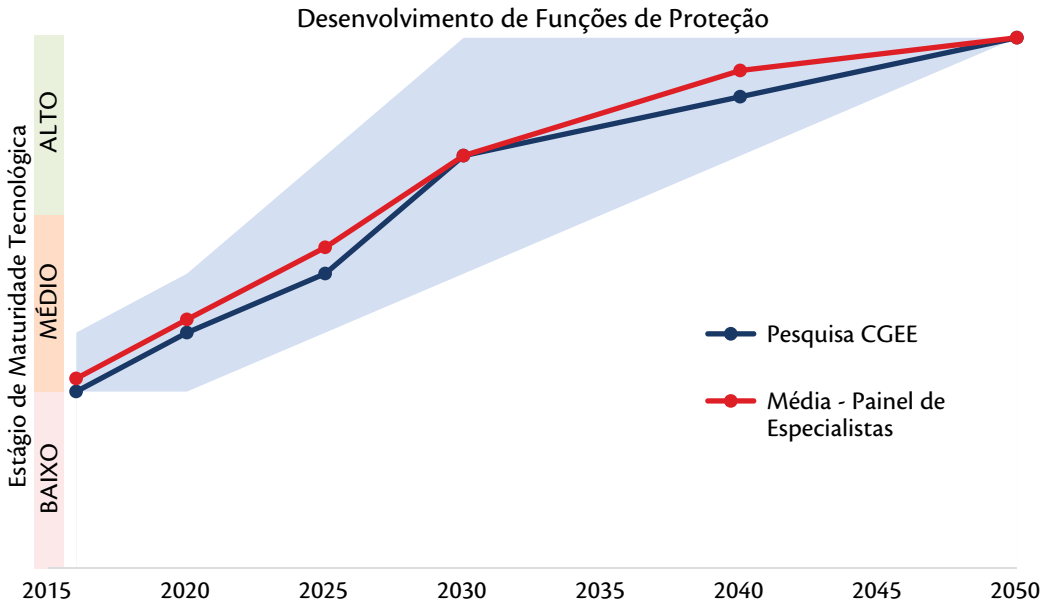

Gráfico 76 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Proteção

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Desenvolvimento de Funções de Localização e Faltas Transitórias

A localização de faltas transitórias é intimamente vinculada à proteção de linhas aéreas de transmissão, além de aplicar-se também às linhas subterrâneas de transmissão, nas quais os defeitos são majoritariamente permanentes. Desnecessário, portanto, ressaltar a sua importância. Qualitativamente, os pesquisadores não terão dificuldades em atingir o estado da arte no tocante a funções de localização de faltas. Do ponto de vista quantitativo, caberá ao setor elétrico organizar-se para mobilizar mão de obra suficiente para atingir as metas estabelecidas até 2050.

A evolução de PD&I sobre Localização de Faltas Transitórias é inerentemente independente dos processos de análise de perturbações e de estatística de desempenho dos componentes e de sua proteção, e da respectiva certificação. O desenvolvimento dessa rota é observada no Gráfico 77.

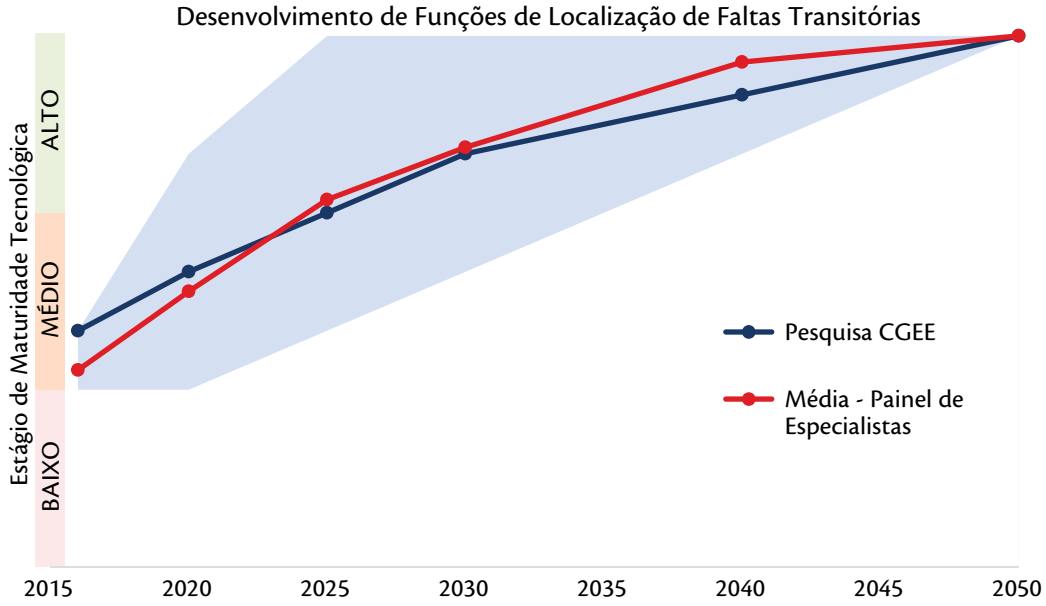

Gráfico 77 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Localização de Faltas Transitórias

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Desenvolvimento de Funções de Automação e Controle

O acompanhamento do nível de integração crescente do *hardware* e a participação brasileira na evolução e na elaboração de normas internacionais seguem o ritmo ditado pelas rotas anteriores.

As funções de automação e controle têm imensa importância nas aplicações de Sips e Wampacs. Com a capacidade de realizar operações matemáticas com números complexos, os IEDs permitiram a criação de lógicas muito mais complexas com menor tempo de processamento.

Os resultados de PD&I quanto à automação de geração e de sistemas de distribuição constituem um importante balizador da adequação do avanço da rota. Ao se conduzir a Estratégia Setorial como preconizado nesta temática, os benefícios serão inerentemente refletidos em todas as rotas desta temática. Para tanto, a evolução de Procedimentos de Rede sobre PAC é crucial para que haja referências explícitas sobre os requisitos da modernização das Redes de Transmissão no País. O desenvolvimento da maturidade desta rota pode ser contemplado no Gráfico 78.

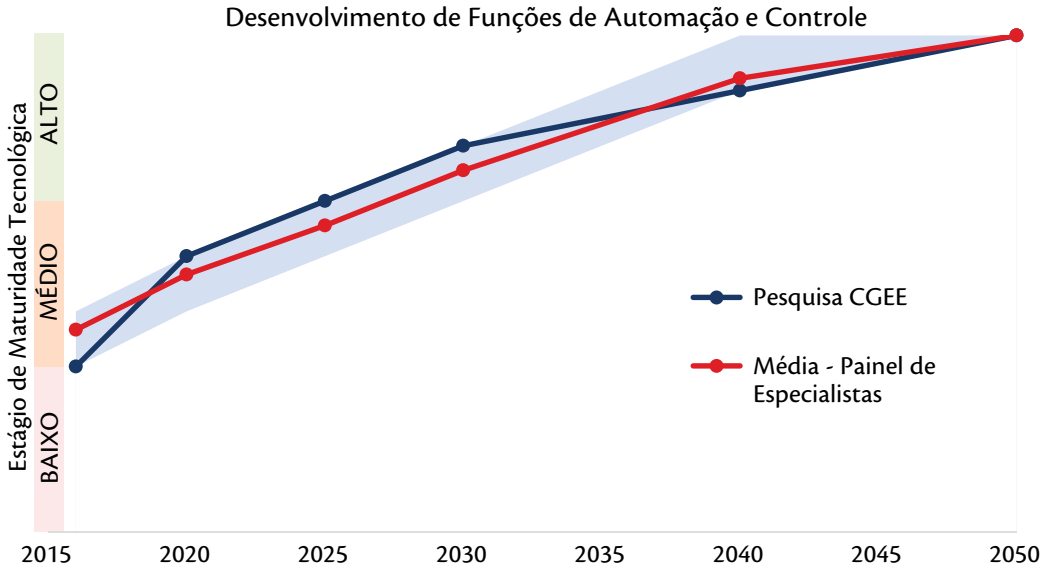

Gráfico 78 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Automação e Controle

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 tecnológicas Desenvolvimento de Funções de Proteção, Desenvolvimento de Funções de Localização e Faltas Transitórias e Desenvolvimento de Funções de Automação e Controle

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Desenvolvimento de leds para Linhas de Transmissão, Barramentos, Transformadores, Reatores Shunt e Série e Bancos de Capacitores Shunt	Desenvolvimento de Funções de Proteção	Fatores portadores de futuro	Definição de Objetivos Conhecimento acumulado (Ex.: Comunidade Brasileira de PAC)	Interesse de empresas brasileiras		Avaliação do nível de integração Ementas na universidade regularmente modernizadas, enfatizando-se o ensino de proteção	Descompasso com o avanço internacional	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Desenvolvimento de Funções de Localização e Faltas Transitórias	Fatores portadores de futuro	Avanço do assunto em instituições de ensino Utilização do conhecimento acumulado			Descompasso com o avanço internacional		
		Maturidade	MÉDIO			ALTO		
	Desenvolvimento de Funções de Automação e Controle	Fatores portadores de futuro	Definição de objetivos Conhecimento acumulado (Ex.: Comunidade Brasileira de PAC)	Grau de interesse nas empresas brasileiras Realimentação sobre requisitos de automação		Avaliação do nível de integração	Risco de descompasso com o avanço internacional	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

10.3.2. Temática desenvolvimento de funções de registrador digital de perturbações e de unidade de medição sincrofasorial

Roadmap tecnológico

Rota - Desenvolvimento de Funções de Registrador Digital de Perturbações (RDP) Stand Alone

A evolução tecnológica antevista para as funções de RDP está essencialmente assegurada pelos esforços já desenvolvidos, os quais geraram produtos que conquistaram o mercado internacional de registradores digitais. Tal evolução pode ser observada no Gráfico 79.

Uma vez que a Estratégia Setorial transcorra como o preconizado para as rotas já apresentadas, os esforços de PD&I em funções de RDP serão inerentemente contemplados.

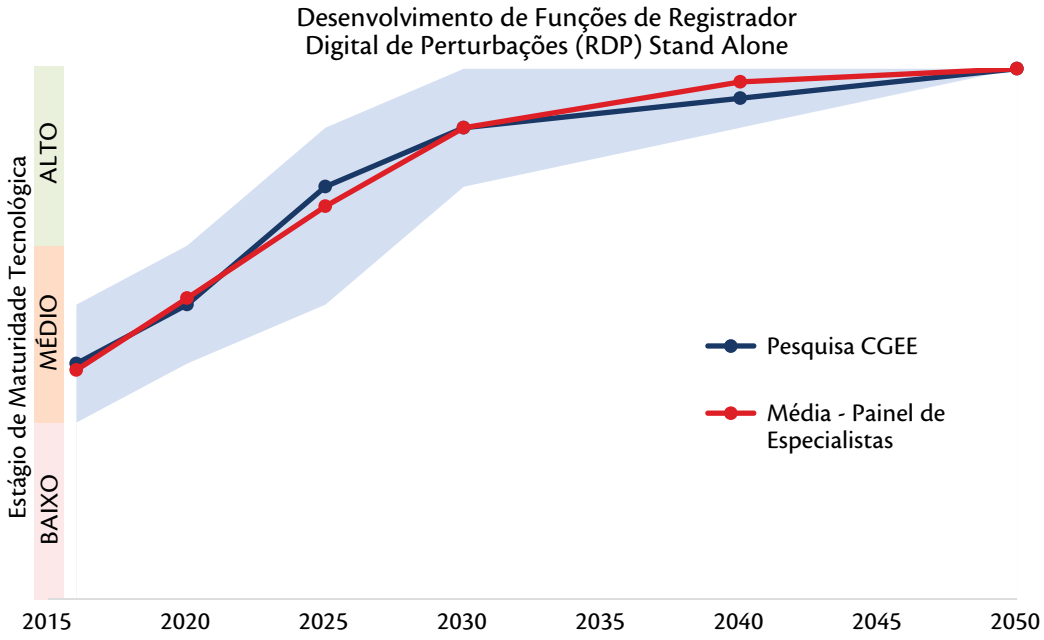

Gráfico 79 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções RDP Stand Alone

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Desenvolvimento de Funções de Unidade de Medição Sincrofasorial (PMU) Stand Alone

As PMUs, compondo SMS, destacam-se por viabilizarem a Estimação de Estado Linear, ou seja, muito mais acurada que a convencional. Os tópicos a seguir resumem a importância do assunto nos sistemas do futuro (ADAMIAK, 2015):

- A definição de estado do sistema elétrico baseia-se no valor modular instantâneo de sequência positiva e ângulo das tensões em todas as barras. Embora os valores dos sincrofasores medidos possam ser empregados diretamente como o estado da rede, podem ser feitas operações para considerar os inevitáveis erros na instrumentação no sistema de medição. Tais operações atualmente desenvolvidas nos SMS baseiam-se na adequação dos mínimos quadrados dos dados medidos em relação ao modelo físico do sistema elétrico. Este processo é denominado de Estimação de Estado Linear, em que a consequente do cálculo do estado estimado é provida por um único conjunto de multiplicação de matrizes.
- O maior fator de mudança das redes do futuro é a perspectiva de basear o controle da rede em termos de análise dinâmica de contingências baseada em sincrofasores. Quando se detecta uma primeira contingência, dado que o sistema elétrico permaneça estável, todas as contingências subsequentes podem então ser analisadas em tempo real, incluindo até mesmo ações remediais corretivas. A aplicação de análise dinâmica de contingências será capacitada a escolher e executar a ação remedial corretiva em tempo real. A meta deste tipo de sistema deve ser a manutenção da estabilidade dos geradores assim que eles comecem a oscilar, implicando um tempo de resposta máximo de 100 ms e que deverá ir sendo reduzido, conforme a inércia do sistema elétrico decaia devido à proliferação de fontes baseadas em inversores, como é comum com a geração distribuída.
- A tendência futura é clara quanto à aplicação da estimação de estado linear nos sistemas de distribuição. Conforme a geração distribuída se expande nas Redes de Distribuição, haverá uma participação crescente da distribuição na geração total do sistema elétrico. Portanto, o conhecimento do estado dos dispositivos inversores da Geração Distribuída - e a habilidade em controlá-los - será um importante desafio no futuro.

Considerando-se esta rota, o Gráfico 80 mostra a evolução de maturidade.

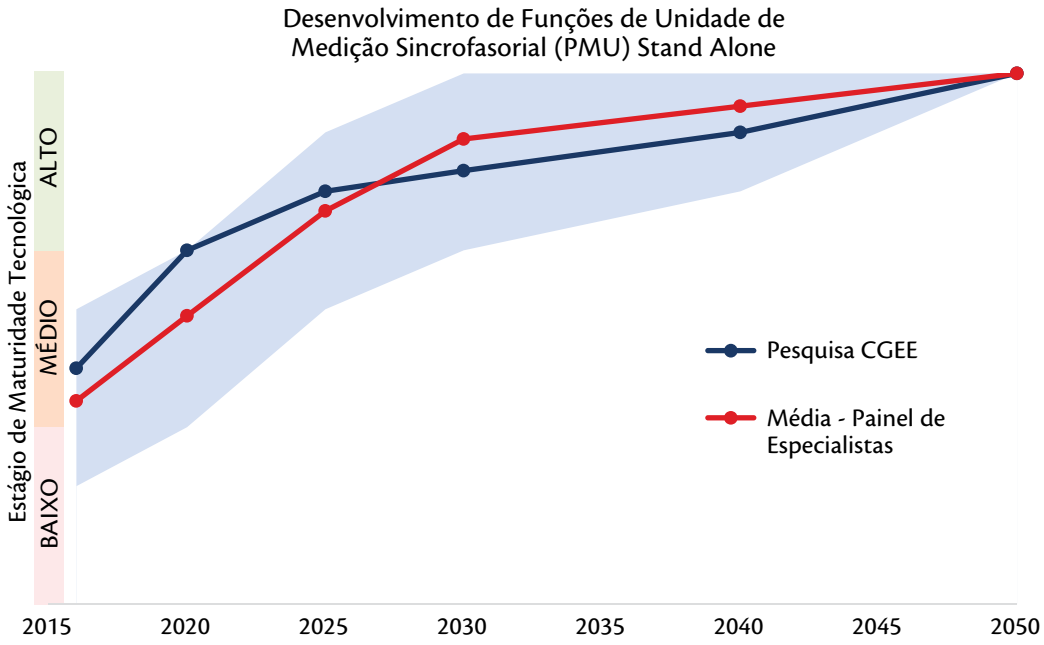

Gráfico 80 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções PMU Stand Alone

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das respectivas rotas são apresentados na tabela 48.

Tabela 48 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desenvolvimento de Funções de Registrador Digital de Perturbações (RDP) Stand Alone e Desenvolvimento de Funções de Unidade de Medição Sincrofasorial (PMU) Stand Alone

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática desenvolvimento de funções de registrador digital de perturbações e de unidade de medição sincrofasorial	Desenvolvimento de Funções de Registrador Digital de Perturbações (RDP) Stand alone	Fatores portadores de futuro	Grupos de pesquisas avançando neste assunto					Risco de descompasso com o avanço internacional
			Apoio comunidade brasileira de PAC					
		Maturidade	MÉDIO	ALTO				
	Desenvolvimento de Funções de Unidade de Medição Sincrofasorial (PMU) Stand Alone	Fatores portadores de futuro	Grupos de pesquisas avançando neste assunto					Risco de descompasso com o avanço internacional
			Apoio comunidade brasileira de PAC					
		Maturidade	MÉDIO	ALTO				

Fonte: Elaboração própria.

10.3.3. Temática desenvolvimento de barramentos óticos de estação e de processo - IEC 61850

Dada a relevância da temática e a baixa disseminação de seu conteúdo técnico entre os tomadores de decisão no Brasil, é fundamental proceder a uma breve cenarização geral da Norma IEC 61850 antes de entrar na cenarização objetiva de cada rota. Os parágrafos abaixo resumem o assunto, tomando Adamiak (2015) como referência.

A Tecnologia Digital e a evolução das Telecomunicações revolucionaram a arte e a ciência de PAC. Os IEDs modernos e a comunicação por barramentos seriais e depois a comunicação IEC 61850-Ethernet, baseada em Internet Protocol (IP), foram os principais fatores de mudança. O desenvolvimento tecnológico em curso impactam consideravelmente a arquitetura de PAC nas subestações. Antes de adaptar ou modificar as arquiteturas existentes, devem ser feitos estudos de confiabilidade e considerado que novas funções poderão ser implementadas nas subestações, tais como o monitoramento de equipamentos e de linhas de AT e EAT, interface com produtores, consumidores e "prossumidores" de energia elétrica, análise automática de eventos etc. O impacto sobre a arquitetura de PAC dependerá do modo de implementação das novas funções e suas interfaces.

Roadmap tecnológico

Rota - Desenvolvimento de Funções de Barramento de Estação - IEC 61850

É bastante promissora em caráter geral e pode ser acompanhada pela PAC World Magazine (www.pacw.org), especialmente pela seção intitulada "IEC 61850 Update" por Christoph Brunner, (it4power, Switzerland). Uma vez que o assunto tem mais um caráter de aplicação do que de PD&I, caberá à governança do SEB, reconhecendo a inexistência de fabricantes nacionais para lidar com a IEC 61850 na extensão que ela demanda, prover o necessário estímulo à academia. Qualitativamente, os pesquisadores não terão dificuldades em atingir o estado da arte no tocante a Funções de Barramento de Estação, ao contrário. Do ponto de vista quantitativo, o SEB deverá organizar-se para mobilizar mão de obra suficiente para atingir as metas estabelecidas até 2050.

O acompanhamento do nível de integração crescente do *hardware* implica eventual necessidade de atualizar os protótipos em 2025. Há a perspectiva de quebra de paradigma no aumento do nível de integração, viabilizando processadores muito mais poderosos e rápidos que os atuais. Estima-se que isto deverá ocorrer entre 2030 e 2040. O mesmo se aplica por analogia com a participação brasileira na evolução e na elaboração de normas internacionais. Quanto à IEC 61850, esta participação já existe, bastando aproximá-la do espírito deste projeto quando este estiver sendo posto em prática no SEB. O Gráfico 81 mostra o desenvolvimento da maturidade da rota apresentada.

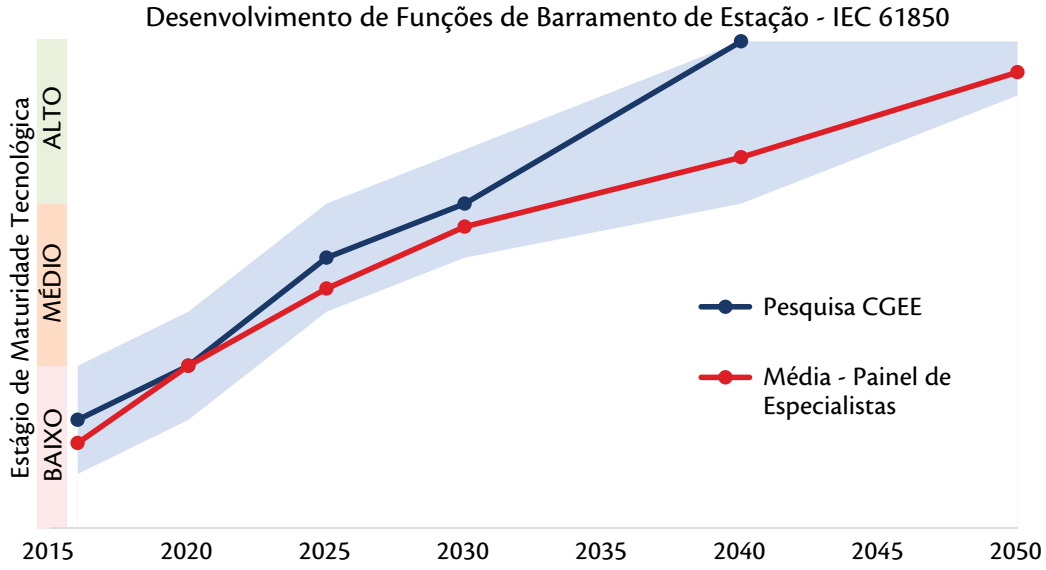

Gráfico 81 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Barramento de Estação - IEC 61850

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Desenvolvimento de Funções de Barramento de Processo - IEC 61850

O acompanhamento do nível de integração crescente do *hardware* implica uma eventual necessidade de atualizar os protótipos em 2025. Há a perspectiva de quebra de paradigma no aumento do nível de integração, viabilizando processadores muito mais poderosos e rápidos que os atuais. Estima-se que isto deverá ocorrer entre 2030 e 2050, justificando reorientar a rota. O mesmo se aplica por analogia com a participação brasileira na evolução e na elaboração de normas internacionais. Quanto à IEC 61850, esta participação já existe, bastando aproximá-la do espírito deste projeto quando este estiver sendo posto em prática no SEB.

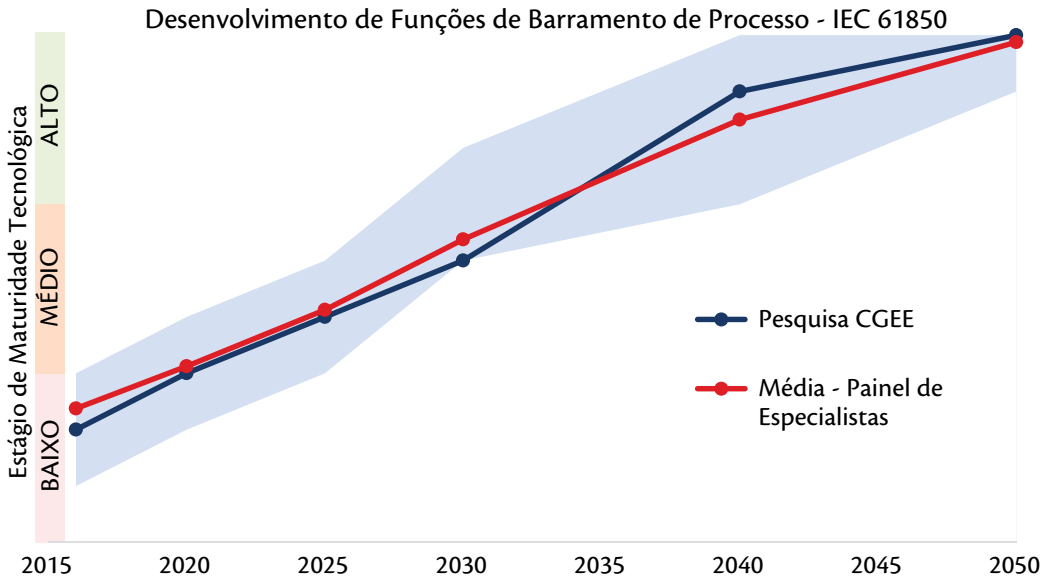

Gráfico 82 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Barramento de Processo - IEC 61850

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 Desenvolvimento de Funções de Barramento de Estação - IEC 61850 e Desenvolvimento de Funções de Barramento de Processo - IEC 61850

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Desenvolvimento de Barramentos Óticos de Estação e de Processo - IEC 61850	Desenvolvimento de Funções de Barramento de Estação - IEC 61850	Fatores portadores de futuro	Estímulo aos pesquisadores em meio acadêmico		Nível de interesse de empresas brasileiras Avaliação do nível de integração		Risco de descompasso com o avanço internacional	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Desenvolvimento de Funções de Barramento de Processo - IEC 61850	Fatores portadores de futuro	Estímulo aos pesquisadores em meio acadêmico		Nível de interesse de empresas brasileiras Avaliação do nível de integração		Risco de descompasso com o avanço internacional	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

10.3.4. Temática desenvolvimento de *softwares* para a aplicação de proteção, automação e controle

Roadmap tecnológico

Rota - Desenvolvimento de Softwares para a Implementação de Proteção Unitária Remota para Curto-Circuito em cada Componente do Sistema Elétrico Empregando Sincrofasores

A evolução tecnológica antevista para a rota toma como base as referências Miron (2012) e Udren (2014). A implementação da Proteção Unitária Remota (PUR) depende essencialmente de um SMS baseado em PMUs do tipo P, adequados a funções de proteção.

O *software* da PUR deve ser instalado em um Centro de Operação, o que justifica a denominação "remota", e permite prescindir dos tradicionais requisitos de compatibilidade eletromagnética típicos para subestações de extra-alta tensão. Por outro lado, a PUR não tem atuação rápida como é inerente ao conceito de Proteção Unitária, pois os sincrofasores têm que ser transmitidos para o Centro de Operação e o comando de disparo tem que retornar à subestação, resultando em um tempo de resposta superior ao de Proteção Unitária, mas inferior ao de Proteção Gradativa de Retaguarda Remota, por exemplo, a segunda zona de um esquema de Proteção de Distância (400 ms ou mais, no Brasil).

Quando aplicada a cada um dos componentes do sistema elétrico, a PUR está longe do conceito de *Wide Area Protection Scheme* (Waps) - caso específico de Wampacs. Se empregada em uma área do sistema elétrico, a PUR pode ser considerada como Waps.

Qualitativamente, os pesquisadores não terão dificuldades em atingir o estado da arte no tocante à PUR. Do ponto de vista quantitativo, caberá ao SEB organizar-se para mobilizar mão de obra suficiente para atingir as metas estabelecidas até 2050.

O acompanhamento do nível de integração crescente do *hardware* implica uma eventual necessidade de atualizar os protótipos em 2025. Há a perspectiva de quebra de paradigma no aumento do nível de integração, viabilizando processadores muito mais poderosos e rápidos que os atuais. Estima-se que isto deverá ocorrer entre 2030 e 2050, justificando reorientar a rota de PUR. O mesmo se aplica por analogia com a participação brasileira na evolução e na elaboração de normas internacionais. A evolução da rota tem a sua maturidade apresentada no Gráfico 83.

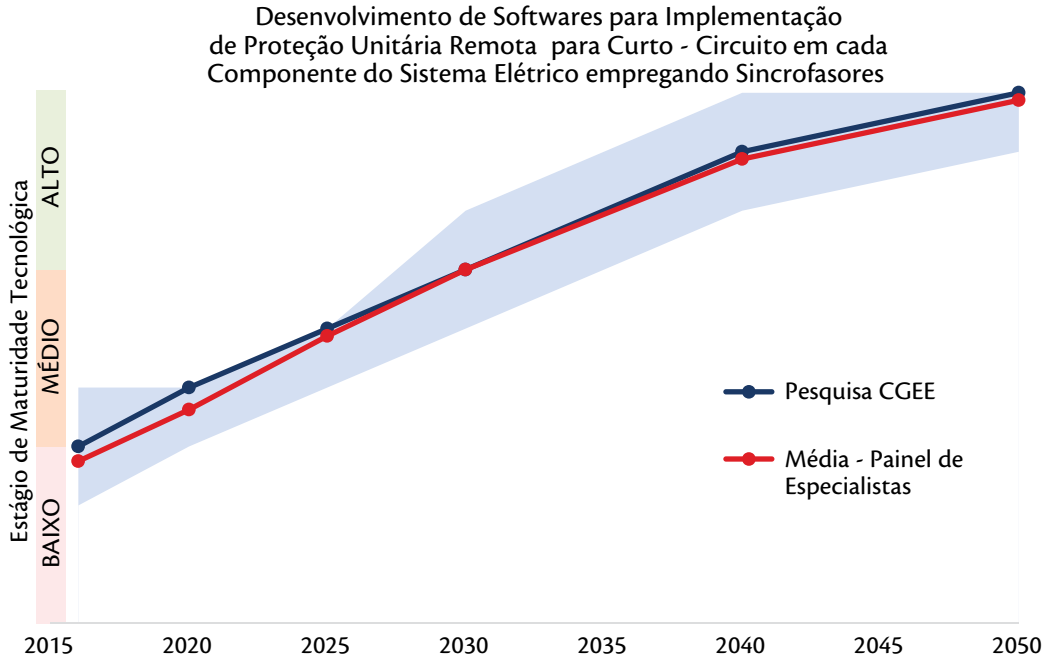

Gráfico 83 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Softwares para Implementação de Proteção Unitária Remota para Curto-circuito em cada Componente do Sistema Elétrico Empregando Sincrofasores

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Desenvolvimento de Softwares para a Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência que se Integrem com os Instrumentos de Testes

No contexto da Macrotemática de PAC da Transmissão, o Desenvolvimento de *Softwares* para a Análise de Transitórios Eletromagnéticos é voltado principalmente para a aplicação em instrumentos e sistemas de teste de alta qualidade e sofisticação.

A Estratégia Setorial pouco ou nada afeta a evolução de *Softwares* para a Análise de Transitórios Eletromagnéticos, visto que no País há em serviço milhares de produtos relacionados com PAC que precisam ser testados quanto ao seu desempenho (exatidão, tempo de resposta etc.), frente à aplicação de formas de onda realistas em termos de transitórios eletromagnéticos. A evolução da maturidade tecnológica da rota tem seu desenvolvimento conforme apresentado no Gráfico 84.

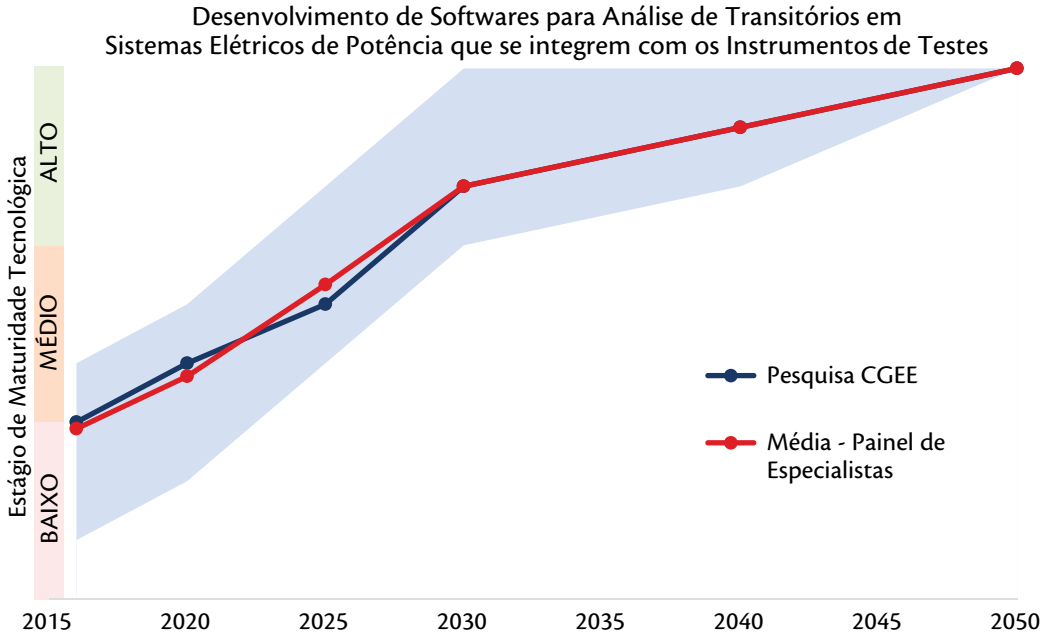

Gráfico 84 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Softwares para a Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência que se Integrem com os Instrumentos de Testes

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Desenvolvimento de software para a aplicação em PAC

A rota caracteriza-se por uma grande diversidade entre suas linhas de pesquisa, que correspondem ao desenvolvimento de *softwares* para as seguintes aplicações:

I) Verificação e determinação (coordenação e seletividade) de ajustes (parametrização) de IEDs;

II) Criação de ferramentas de engenharia para subestações com PAC baseado na norma IEC 61850;

III) Aplicação de RDPs, PMUs e Phasor Data Concentrators (PDCs);

IV) Viabilizar multifuncionalidade;

V) Prover compatibilidade com a norma IEC 61850 e com o Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia (Sage) do Cepel;

VI) Prover recursos de adaptabilidade (adaptabilidade propriamente dita e identificação

dos novos modos de falha criados pela introdução da adaptabilidade e implementação dos respectivos mecanismos de recuperação);

VII) Prover segurança cibernética;

VIII) *Softwares* baseados em algoritmos de resolução ultrarrápida de instabilidades angular e de tensão acrescidos de modelos fasoriais dinâmicos de proteção, Sips e Wampacs.

A cenarização será apresentada para as linhas de pesquisa com afinidade entre si.

A Linha de Pesquisa I é um desafio porque as Empresas de Transmissão já dispõem de *softwares* para a coordenação e a seletividade desenvolvidos por fornecedores multinacionais, cujos bancos de dados são muito trabalhosos de montar, fato que desestimula a substituição por produto nacional.

As linhas de Pesquisa II, IV e V comungam por meio da norma IEC 61850. A Linha de Pesquisa II é a mais desafiadora, visto que permanece incipiente no cenário internacional. As linhas de Pesquisa IV e V já têm resultados por parte do Cepel, que os aplica no Sage.

A Linha de Pesquisa III já tem resultados na forma de produtos do Cepel para tratar os registros de grandezas analógicas e digitais produzidos por RDPs. O Projeto de Medição Sincrofasorial do ONS, já em andamento, certamente vai apresentar soluções interessantes quanto a PMUs, PDCs e Super PDCs.

A Linha de Pesquisa VI é um empreendimento de cooperação entre PD&I e Aplicação. Ela permanece incipiente no cenário internacional.

Uma alternativa que vem sendo adotada nos Sistemas de Supervisão e Controle (SSCs) é a aquisição de serviços completos de segurança cibernética junto a fornecedores multinacionais. A integração dos *softwares* de segurança cibernética com os SSCs (Scada + EMS) tende a ser trabalhosa e susceptível a impasses. A Linha de Pesquisa VII tende a ser muito bem-vinda pela Comunidade Brasileira de PAC.

A Linha de Pesquisa VIII cobre um amplo espectro de aplicações, desde o uso *offline* para estudos elétricos de planejamento do sistema elétrico, planejamento da operação e programação da operação, atingindo o cerne de aplicações em tempo real, como é o caso de Early Warning Systems nos Centros de Operação. O grande desafio da Linha de Pesquisa VIII é o requisito de resolução ultrarrápida de redes de grande porte no tocante a instabilidades angular e de tensão. O ONS já tem diversos produtos no gênero providos pela empresa nacional High Performance Power System Applications (HPPA - www.hppa.com.br). Um aumento de PD&I nos temas da Linha de Pesquisa VIII terá muito boa receptividade no SEB.

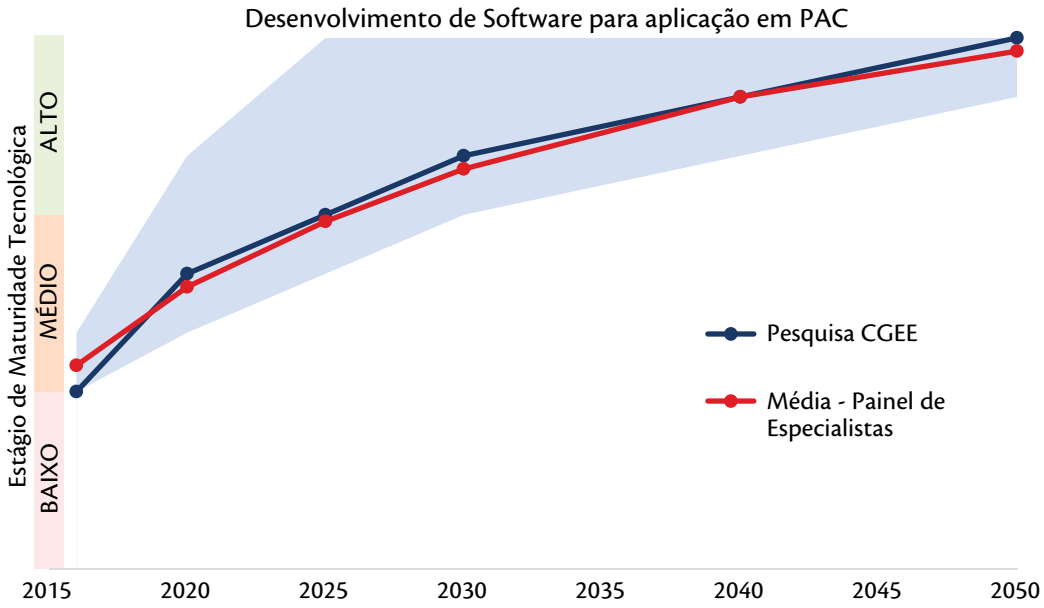

Gráfico 85 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Software para Aplicação em PAC

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 para as rotas tecnológicas Desenvolvimento de *Softwares* para Implementação de Proteção Unitária Remota para Curto-Circuito em cada Componente do Sistema Elétrico Empregando Sincrofasores, Desenvolvimento de *Softwares* para Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência que se integrem com os Instrumentos de Testes e Desenvolvimento de *Software* para Aplicação em PAC

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Desenvolvimento de Softwares para Aplicação de Proteção, Automação e Controle	Desenvolvimento de Softwares para Implementação de Proteção Unitária Remota para Curto-Circuito em cada Componente do Sistema Elétrico Empregando Sincrofasores	Fatores portadores de futuro	Definição de objetivos	Nível de interesse de empresas brasileiras Conhecimento acumulado		Avaliação do nível de integração	Risco de descompasso com o avanço internacional	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO			ALTO	
	Desenvolvimento de Softwares para Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência que se Integrem com os Instrumentos de Testes	'Fatores portadores de futuro	Avanço de empresas especializadas no assunto				Risco de descompasso com o avanço internacional	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		
	Desenvolvimento de Software para Aplicação em PAC	'Fatores portadores de futuro	Academia apoiando o tema		Nível de interesse das empresas brasileiras		Risco de descompasso com o avanço internacional	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO		ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

10.3.5. Temática desenvolvimento de *softwares* para aplicação de proteção, automação e controle

Rota - Desenvolvimento de equipamentos de testes para PAC

A Estratégia Setorial pouco ou nada afeta a evolução de Equipamentos de Teste para PAC, visto que no País há em serviço milhares de produtos relacionados com PAC que precisam ser testados. A evolução de tais produtos estimula a evolução de Equipamentos de Teste para PAC (ver Gráfico 86).

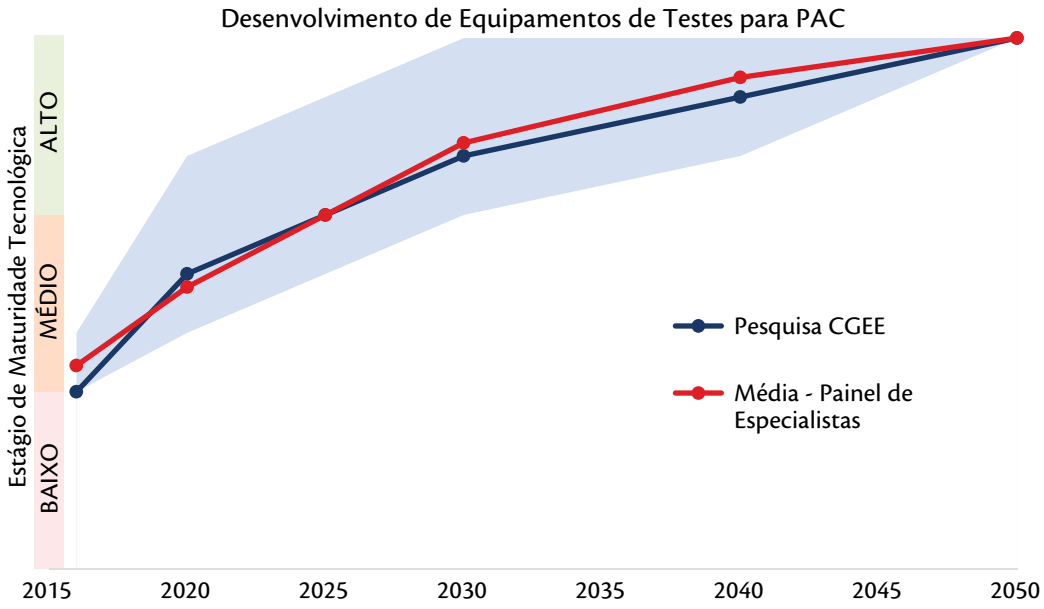

Gráfico 86 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Equipamentos de Testes para PAC

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Desenvolvimento de Ferramentas para Sistemas de Testes em Tempo Real

A cenarização antevista para a rota é bastante auspiciosa, por haver excelente receptividade por parte das Empresas de Transmissão. A Evolução Tecnológica de Ferramentas para Sistemas de Testes em

Tempo Real é praticamente garantida no Brasil, devido ao longo histórico de sucesso em termos de PD&I, produção, comercialização e gestão do conhecimento (*Knowledge Management*).

A Estratégia Setorial não tende a afetar adversamente a evolução da rota, mas pode ser indiretamente estimulante se vier a incentivar a modernização de PAC pela adoção de produtos digitais numéricos, os quais são muito mais adequados para serem submetidos a Testes em Tempo Real. A evolução da maturidade é apresentada no Gráfico 87.

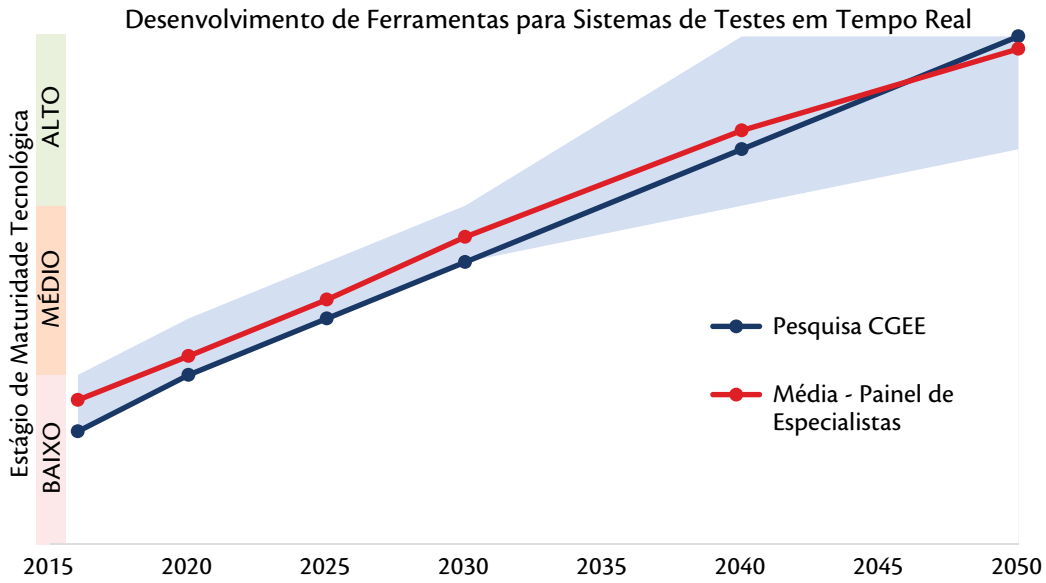

Gráfico 87 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Ferramentas para Sistemas de Testes em Tempo Real

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 Desenvolvimento de Equipamentos de Testes para PAC e Desenvolvimento de Ferramentas para Sistemas de Testes em Tempo Real

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Desenvolvimento de Softwares para Aplicação de Proteção, Automação e Controle	Desenvolvimento de Equipamentos de Testes para PAC	Fatores portadores de futuro	Empresas especializadas no assunto				Risco de descompasso com o avanço internacional	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO			ALTO	
	Desenvolvimento de Ferramentas para Sistemas de Testes em Tempo Real	Fatores portadores de futuro	Empresas especializadas no assunto				Risco de descompasso com o avanço internacional	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

10.4. Priorização

Ordem de prioridade

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia"), 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 52.

Tabela 52 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Proteção, Automação e Controle do Sistema de Transmissão

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Desenvolvimento de Funções de Proteção	Desenvolvimento de IEDs para Linhas de Transmissão, Barramentos, Transformadores, Reatores Shunt e Série e Bancos de Capacitores Shunt
2	Desenvolvimento de Ferramentas para Sistemas de Testes em Tempo Real	Desenvolvimento de Instrumentos para Testes Primários e Secundários de Sistemas de Proteção, Automação e Controle
3	Desenvolvimento de Funções de Localização de Faltas Transitórias	Desenvolvimento de IEDs para Linhas de Transmissão, Barramentos, Transformadores, Reatores Shunt e Série e Bancos de Capacitores Shunt
4	Desenvolvimento de Funções de Automação e Controle	Desenvolvimento de IEDs para Linhas de Transmissão, Barramentos, Transformadores, Reatores Shunt e Série e Bancos de Capacitores Shunt
5	Desenvolvimento de Funções de Barramento de Processo - IEC 61850	Desenvolvimento de Barramentos Óticos de Estação e de Processo - IEC 61850
6	Desenvolvimento de Funções de RDP Stand Alone	Desenvolvimento de Funções de Registrador Digital de Perturbações e de Unidade de Medição Sincrofasorial
7	Desenvolvimento de Funções de Unidade de Medição Sincrofasorial (PMU) Stand Alone	Desenvolvimento de Funções de Registrador Digital de Perturbações e de Unidade de Medição Sincrofasorial
8	Desenvolvimento de Funções de Barramento de Estação - IEC 61850	Desenvolvimento de Barramentos Óticos de Estação e de Processo - IEC 61850
9	Desenvolvimento de Equipamentos de Testes para PAC	Desenvolvimento de Instrumentos para Testes Primários e Secundários de Sistemas de Proteção, Automação e Controle
10	Desenvolvimento de Softwares para Aplicação de PAC	Desenvolvimento de ***Software***s para Aplicação de PAC
11	Desenvolvimento de ***Softwares*** para Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos	Desenvolvimento de ***Software***s para Aplicação de PAC
12	Desenvolvimento de Softwares para Implementação de Proteção Unitária Remota	Desenvolvimento de ***Software***s para Aplicação de PAC

Fonte: Elaboração própria.

Prioridade 1 - Desenvolvimento de Funções de Proteção

A Rota Funções de Proteção desfruta de alta prioridade porque a expectativa de ocorrência de grandes desafios específicos de inovação e ampliação de horizontes reside sempre nos recursos necessários à eliminação seletiva de curtos-circuitos e de outros defeitos inerentes aos componentes do Sistema de Transmissão.

Por exemplo, o esforço de PD&I sobre a Linha de Pesquisa de desenvolvimento de função de distância, direcional e diferencial no domínio do tempo, tem boa receptividade no SEB por permitir eliminação ultrarrápida de faltas, o que contribui significativamente para a manutenção da estabilidade angular, problema típico de sistemas elétricos com as dimensões geográficas do SIN.

Prioridade 2 - Desenvolvimento de Ferramentas para Sistemas de Testes em Tempo Real

As Empresas de Transmissão têm trabalhado seriamente para diminuir a necessidade e o tempo de indisponibilidade de um componente do sistema, em decorrência da redução de sua remuneração na rubrica denominada Parcela Variável. A perspectiva de poder realizar testes nos dispositivos e funções de PAC em tempo real sem desligar os componentes (linhas de transmissão, transformadores etc.) explica a atribuição de prioridade 2 para os Sistemas de Teste em Tempo Real.

Prioridade 3 - Desenvolvimento de Funções de Localização de Faltas Transitórias

Tendo havido menção à Parcela Variável, vêm logo à baila curtos-circuitos internos às linhas de transmissão, porque ocasionam uma parcela altamente significativa de redução na remuneração do agente. Portanto, é natural que a Rota de Funções de Localização de Faltas Transitórias receba a prioridade 3, porque a proteção de linhas e esta rota são intimamente ligadas na melhoria do desempenho em termos de aplicação da Parcela Variável.

Basta lembrar que a localização de faltas transitórias e a proteção de distância para linhas têm a mesma origem histórica, mas a primeira só pôde ser eficientemente desenvolvida depois do advento da tecnologia digital na Ciência de PAC.

Prioridade 4 - Desenvolvimento de Funções de Automação e Controle

As três primeiras prioridades foram ocupadas com os desligamentos forçados e o tempo durante o qual o componente envolvido fica fora de serviço. Assim, a Rota de Funções de Automação e Controle assume o nível 4 de priorização, pois é o meio de prover recursos para a operação do Sistema de Transmissão por acessos local e remoto.

Acresce que a Rota de Automação e Controle viabiliza a implementação de automatismos de toda sorte e permite a implementação de Proteção Adaptativa, Sips e Wampacs. Estes dois últimos tipos de esquemas possibilitam que o SIN suporte contingências severas sem perda significativa de carga, fato de grande importância para o desempenho global do SIN.

Prioridade 5 - Desenvolvimento de Funções de Barramento de Processo - IEC 61850

Ao oferecer a eliminação da custosa cablagem de condutores de cobre entre a sala de controle e os vãos da subestação, o Barramento de Processo foi granjeado com a quinta prioridade. Além da redução de custos de instalação, esta rota proporciona a diminuição dos riscos de desligamentos automáticos acidentais quando da inserção ou da retirada de um cabo das canaletas convencionais.

Cabe lembrar que, de acordo com as estatísticas de desligamentos forçados, esse tipo de acidente com frequência envolve a atuação acidental de funções de proteção como proteção de barras ou esquemas para falha de disjuntor, passíveis de desligar uma seção de barras, ou o barramento completo ou até mesmo toda a subestação.

Prioridade 6 - Desenvolvimento de Funções de Registrador Digital de Perturbações (RDP) *Stand Alone*

Como sexta prioridade surge a Rota de Funções de Registrador Digital de Perturbações para viabilizar análises acuradas de perturbações, para que se possa colocar em prática e aperfeiçoar permanentemente o processo estatístico de desempenho da proteção, conforme preconizado nos Indicadores do Futuro em termos do Cenário Ambiental e Social. Muitas vezes as definições de necessidade de Sips têm origem em eventos reais que não foram antecipados nas diversas fases de

planejamento e programação, justamente por consistirem em uma cadeia de eventos aleatória que só Sips conseguem quebrar (ORDACGI, 2010).

Os esforços de PD&I que receberam prioridades mais estringentes que este nível seis serão facilitados por se realimentarem de eventos reais na forma de registros de sequência de eventos e de formas de onda de tensões e correntes. Esses recursos permitem analisar em profundidade eventuais problemas encontrados, dentre os quais não se pode afastar a possibilidade de concepção inadequada de dispositivos e funções oriundos de uma ou mais temáticas que constituem a Macrotemática PAC da Transmissão.

Prioridade 7 - Desenvolvimento de Funções de Unidade de Medição Sincrofasorial (PMU) *Stand Alone*

A prioridade 7 foi atribuída às PMUs e consequentemente aos Sistemas de Medição Sincrofasorial pela importância que têm na operação do sistema elétrico em regime permanente, em emergência e durante contingências das mais variadas gravidades. Ademais, as PMUs são indispensáveis na implementação de Wampacs (THORP, 2010).

Prioridade 8 - Desenvolvimento de Funções de Barramento de Estação - IEC 61850

O Barramento de Estação recebeu prioridade 8, subsequente às PMUs, por ser o meio adequado de implementação de todas as funções de PAC em uma subestação.

Prioridade 9 - Desenvolvimento de Equipamentos de Testes para PAC

Os Equipamentos de Testes convencionais ocupam a prioridade 9 por simples comparação de importância relativa com as Ferramentas para Sistemas de Testes em Tempo Real, que ficaram em prioridade 2 pelo seu caráter de inovação e pela expectativa dos usuários.

Prioridade 10 - Desenvolvimento de Softwares para Aplicação em PAC

A análise da rota 10 mostra que há grande diversidade entre suas linhas de pesquisa. Pode-se dizer que uma priorização mais acurada só seria viável pela média das prioridades atribuídas às suas oito linhas de pesquisa, mas a Metodologia do Projeto de Prospecção Tecnológica do Setor de Energia Elétrica, corretamente, assegura isonomia entre as rotas. Neste universo, os *Software*s para Aplicação em PAC ficaram em prioridade 10.

Prioridade 11 - Desenvolvimento de *Softwares* para Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos

A visão do momento na Comunidade Brasileira de PAC é que esses *software*s serão aplicados em equipamentos e ferramentas de testes no Brasil, fato que explica a atribuição da penúltima prioridade. Quando este tipo de ferramenta estiver disponível, é muito provável que a comunidade venha a rever a sua posição.

Prioridade 12 - Desenvolvimento de *Softwares* para Implementação de Proteção Unitária Remota

Nada mais natural que a última prioridade ser atribuída a uma rota que contribuirá para aumentar a confiabilidade da proteção, que no SIN já desfruta de excelente confiabilidade em decorrência do que é preconizado nos Procedimentos de Rede de PAC. Por outro lado, a Proteção Unitária Remota tem o atrativo de ser um recurso independente em situações de falha oculta de modo comum a dois esquemas de proteção (principal e alternada), como já ocorreu na Interligação Norte-Sudeste do SIN e no estado da Geórgia, nos EUA.

Capítulo 11

Capítulo 11

Macrotemática Redes Elétricas Inteligentes no Sistema Interligado Nacional (SIN)

Esta macrotemática visa analisar o impacto das tecnologias englobadas sob a denominação genérica de Redes Elétricas Inteligentes (REI) (ou *Smart Grid* em inglês) no SIN, particularmente no sistema de transmissão.

As tecnologias de REI têm apresentado maior penetração em aplicações nas redes de distribuição de energia elétrica. No caso do sistema interligado, a novidade tecnológica que vem provocando grande modificação nas técnicas de supervisão e controle é a chamada Medição Fasorial Sincronizada (MFS), baseada no componente conhecido como Unidade de Medição Fasorial, ou *Phasor Measurement Unit* (PMU), o qual permite uma monitoração muito mais precisa das grandezas elétricas importantes para várias atividades de supervisão e controle, além de permitir a sincronização das informações através de sinal de tempo do sistema *Global Positioning System* (GPS). As várias aplicações decorrentes da introdução dos PMUs constituem o que se pode chamar de REI no Sistema Interligado.

O monitoramento, o controle e a proteção dos sistemas de energia elétrica, particularmente do sistema interligado, tradicionalmente utilizam uma lógica local, ou seja, as informações relativas à operação do sistema são adquiridas em uma subestação ou, no máximo, em subestações vizinhas, e a decisão, ou ação de controle ou proteção, é aplicada nessas mesmas subestações. Dois desenvolvimentos, já presentes nos sistemas interligados há relativamente longo tempo, divergem um pouco dessa lógica: a teleproteção e o sistema Scada/EMS.[12] O primeiro consiste na utilização de informações remotas para acionar sistemas de proteção; e o segundo inclui a aquisição de informações telemedidas ao longo do sistema para a supervisão de operadores humanos, o qual posteriormente evoluiu para um sistema de gerenciamento de energia provido de recursos mais sofisticados de tomada de decisões, algumas das quais automáticas ou semiautomáticas. O sistema Scada/EMS pode atingir uma área

12 Scada: Supervisory Control and Data Acquisition System; EMS: Energy Management System.

ampla do sistema, porém é limitado pelas taxas de amostragem relativamente elevadas (varreduras com duração de 1-2 segundos) e sincronização precária das informações.

A introdução da MFS vem proporcionando a possibilidade de estender a monitoração, o controle e a proteção para áreas amplas do sistema elétrico. Essa extensão é possível devido à possibilidade de sincronização com muita precisão das grandezas medidas pelos PMUs (tensões, correntes e frequência) através de sinal de tempo do Sistema GPS. Assim, é possível acompanhar de forma precisa a evolução temporal de grandezas elétricas representativas do funcionamento do sistema elétrico e, em certos limites, antecipar fenômenos que poderiam ocasionar falhas graves no sistema.

As temáticas identificadas nesta macrotemática foram:

- *Estratégias e Sistemas de Monitoramento, Controle, Proteção e Automação de Área Ampla*: reúne vários desenvolvimentos paralelos e superpostos conhecidos por Wampac e Wide Area Situational Awareness (Wasa), dentre outras siglas.
- *Novas Tecnologias de Suporte a Tomada de Decisões no SIN:* a disponibilidade de informações em área ampla proporciona a possibilidade de uma capacidade de sintetizar um volume grande de informações e permitir um diagnóstico preciso da situação operacional do sistema.
- *Sensoriamento, Medição e Monitoramento*: uma série de dispositivos de sensoriamento dos sistemas de transmissão tem sido introduzida recentemente, trazendo embutidos, além do sensor propriamente dito, recursos de comunicação através da própria rede elétrica ou outro meio de comunicação *wireless* ou via fibras óticas.
- *Integração de Sistemas de Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC)*: a infraestrutura de TIC já existente para os sistemas Scada/EMS deve ser ampliada para acomodar a informação da medição fasorial sincronizada e o aumento exponencial no volume de informação através de tecnologia de Big Data.
- *Integração de Redes Elétricas Inteligentes da Geração/Transmissão:* a intermitência das novas fontes renováveis (eólica e solar) exige um monitoramento mais próximo das variações de geração e seus efeitos no desempenho do sistema interligado.
- *Integração de Redes Elétricas Inteligentes da Transmissão/Distribuição*: a presença de geração distribuída e de esquemas de gerenciamento da demanda nos sistemas de distribuição exigem uma maior integração com os sistemas de monitoração e controle da transmissão.

11.1. Visão de futuro

O objetivo principal desta macrotemática é o desenvolvimento de processos e de métodos visando ao aumento da confiabilidade e da segurança do SIN frente aos desafios trazidos pela introdução de fontes intermitentes de energia (eólica e solar), longas linhas de transmissão, imprevisibilidade da contribuição da geração distribuída etc.

11.1.1. Cenário setorial

Os sistemas de energia elétrica experimentam um período de grande transformação. As tecnologias reunidas sobre a denominação genérica de Redes Elétricas Inteligentes, mediante a introdução em larga escala de tecnologias de informação, comunicação e automação no controle desses sistemas, têm o potencial para modificar completamente a forma como esses sistemas funcionam. No caso dos sistemas interligados, a tecnologia de medição fasorial sincronizada (PMU) vem permitindo o aperfeiçoamento de técnicas de supervisão, controle e proteção em área ampla, ou seja, considerando o processamento conjunto de informação de todo o sistema elétrico.

A disponibilidade de informações precisas, obtidas com taxas de amostragem elevadas e sincronizadas, e a disponibilidade de sistemas de comunicações de dados de alta velocidade e confiabilidade, aliadas à elevada capacidade de processamento, proporcionam a possibilidade de implementação de sofisticados sistemas de monitoração, proteção, controle e automação, capazes de se antecipar a potenciais situações operativas capazes de gerar falhas catastróficas no sistema interligado. No futuro, esses sistemas se beneficiarão das modernas tecnologias de informação, como as técnicas de Big Data, Internet das Coisas (IoT) e computação em Nuvem, permitindo melhorar a chamada Consciência Situacional do sistema.

11.1.2. Objetivo geral

O foco principal dos investimentos em PD&I deve ser na absorção, adaptação e aperfeiçoamento da cadeia de produtos necessários à implantação no País da tecnologia de supervisão, controle, proteção e automação em área ampla do SIN, incluindo o desenvolvimento de metodologias, aplicativos e dispositivo tais como *software* para a monitoração e o controle, unidades de medição fasorial, concentradores de dados, *hardware* para redes de comunicações, automação de subestações etc.

11.1.3. Objetivo específico

Para suportar o objetivo geral, é necessário que se obtenham por meio do PD&I os principais fatores motivadores para a sua aplicação, aqui separados em atividades de curto, médio e longo prazo.

Curto prazo (2017-2020):

Em curto prazo, ou seja, de 2017 a 2020, o objetivo a ser alcançado com o desenvolvimento dos estudos de P&D é:

- Tecnologias para monitoração do sistema interligado a partir de dados de PMUs, incluindo estimadores de estado;
- Tecnologias relacionadas ao uso confiável e efetivo de unidades de medição fasorial e concentradores de dados fasoriais;
- Tecnologias para apoio à avaliação *online* da segurança estática e dinâmica do sistema, e recomposição a partir de dados de PMUs;
- Tecnologias de *software* e *hardware* para gerenciamento *online* da capacidade de transmissão e monitoramento de equipamentos em geral;

Médio prazo (2020-2030):

Em médio prazo, ou seja, de 2020 a 2030, será necessário o desenvolvimento de PD&I a fim de permitir uma evolução para atingir os seguintes objetivos:

- Técnicas para segurança cibernética específica para aplicações no SIN;
- Novas tecnologias relacionadas a unidades de medição fasorial e a concentradores de dados fasoriais para o sistema elétrico brasileiro;
- Tecnologias para avaliação *online* da segurança estática e dinâmica do sistema e recomposição a partir de dados de PMUs;
- Novas arquiteturas de redes de computadores e respectivos *hardware*s para a interação das subestações automatizadas e dos centros de controle sistêmicos.

Longo prazo (2030-2050):

Em longo prazo, ou seja, entre 2030 e 2050, teremos como objetivos específicos:

- Uso de técnicas de Big Data para a detecção, identificação e prevenção de falhas catastróficas no sistema interligado baseado em informações de fontes diversas (*Situational Awareness*), e para o aperfeiçoamento dos critérios e processos de planejamento;
- Utilização do conceito de Internet das Coisas (Internet of Things - IoT) na monitoração e no controle *online* do sistema interligado.

Aplicação de Computação em Nuvem na monitoração e no controle *online* do sistema interligado.

11.1.4. Fundamentação

A visão de futuro apresentada para esta macrotemática foi fundamentada na observação de que a evolução dos sistemas de monitoração, controle, proteção e automação dos sistemas elétricos interligados, em todo o mundo, vem seguindo um padrão comum, o qual consiste na migração dos sistemas Scada/EMS, baseados em dados obtido por unidades terminais remotas, com tempo de amostragem relativamente elevado, para sistemas baseados em redes de PMUs, com tempos de amostragem muito menores e sincronizados via GPS. Esta evolução se apresenta como uma solução para os problemas introduzidos pela elevada participação de fontes de geração intermitentes nos sistemas atuais, particularmente eólica e solar, e a crescente introdução de geração distribuída conectada aos sistemas de distribuição.

Esta tendência está documentada em publicações de grande repercussão. Além das tendências relatadas acima, é relevante considerar duas outras tendências já observadas em outros países: a introdução de técnicas de gerenciamento da demanda para compensar a variabilidade das fontes renováveis e o uso de tecnologias avançadas de informação, tais como a Computação em Nuvem, Big Data e Internet das Coisa (IoT).

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 de tempo até 2050 (ver Anexo). Como fundamentação para as respectivas métricas, este documento chama a atenção aos seguinte pontos:

- Crescimento continuado da fonte eólica e um grande crescimento da fonte fotovoltaica até 2025 ou 2030;
- Após 2030, a fonte fotovoltaica terá grande crescimento na forma de geração distribuída;
- A geração distribuída em geral deverá atender a cerca de 10% da demanda em 2030;
- Existe uma tendência de ampliar o uso de PMUs e de diversos tipos de sensores para monitorar equipamentos e o sistema como um todo;
- Procedimentos de gerenciamento da demanda deverão ser introduzidos de forma crescente até um horizonte de 2030, para compensar a variabilidade da fonte hidrelétrica e das novas fontes renováveis. Procedimentos já implementados no País são as Bandeiras Tarifárias e a Tarifa Branca.
- O uso de tecnologias avançadas de informação, tais como a Computação em Nuvem, Big Data e Internet das Coisa (IoT), deverão ser de uso comum na supervisão e no controle em tempo real do sistema elétrico a partir de 2030.

No contexto da evolução tecnológica, as métricas (ver Anexo) que subsidiarão o cenário da macrotemática dizem respeito a:

- **Consciência situacional e prevenção de falhas graves no sistema interligado:** *software* para monitoração da segurança e gerenciamento de equipamentos, permitindo a prevenção *online* da segurança estática e dinâmica, aplicando técnicas de computação em Nuvem, IoT e Big Data.
- **Monitoramento de equipamentos do sistema elétrico:** Centralização do monitoramento por meio do sistema Scada e redes de PMUs, utilizando as técnicas de computação em nuvem, IoT e Big Data.
- **Equipamentos de medição fasorial, concentradores, comunicação de dados, e sensores em geral:** desenvolvimento da cadeia produtiva nacional, e como parâmetro se verifica a porcentagem de componentes fabricados no Brasil.

- **Tecnologia de segurança cibernética específica para aplicações no sistema elétrico**: aplicação continuada de tecnologias de segurança cibernética, de acordo com a evolução tecnológica internacional.
- **Geração centralizada com fontes intermitentes (eólica e solar):** com a crescente entrada das energias eólica e solar no sistema, a métrica prevê porcentagem da capacidade instalada.
- **Geração distribuída, armazenamento e gerenciamento da demanda:** verificação do nível de influência da inserção da GD, armazenamento e gerenciamento da demanda nos sistemas de distribuição na demanda total do sistema interligado.

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 SEB potencializam a melhora ou a participação dessas questões no SEB, com impacto positivo ao desenvolvimento das rotas tecnológicas.

11.3. Estudo e prospecção das rotas tecnológicas

Neste capítulo, são abordadas as métricas de desenvolvimento e as curvas de evolução da maturidade tecnológica das rotas consideradas no projeto. Tais pontos são apresentados, por temática, nos itens subsequentes.

11.3.1. Temática estratégias e sistemas de monitoramento, controle e proteção de área ampla

Roadmap tecnológico

Rota - Wasa e Wampac

A presente rota já se encontra em desenvolvimento no País, como pode ser constatado pela implantação do novo sistema de supervisão e controle (Reger) e da rede PMUs pelo ONS. Desenvolvimentos importantes são também o do Sistema Med Fasee, um projeto acadêmico liderado pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e o do *software* Organon para aplicações em avaliação dinâmica da segurança em tempo real, e um desenvolvimento realizado no mesmo tema pelo Cepel, em colaboração com a Coppe/UFRJ e Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Os trabalhos em andamento indicam

que o País possui material humano e infraestrutura adequados ao desenvolvimento da rota, os quais devem ser mantidos e ampliados de acordo com as necessidades futuras. A evolução da rota pode ser observada no Gráfico 88.

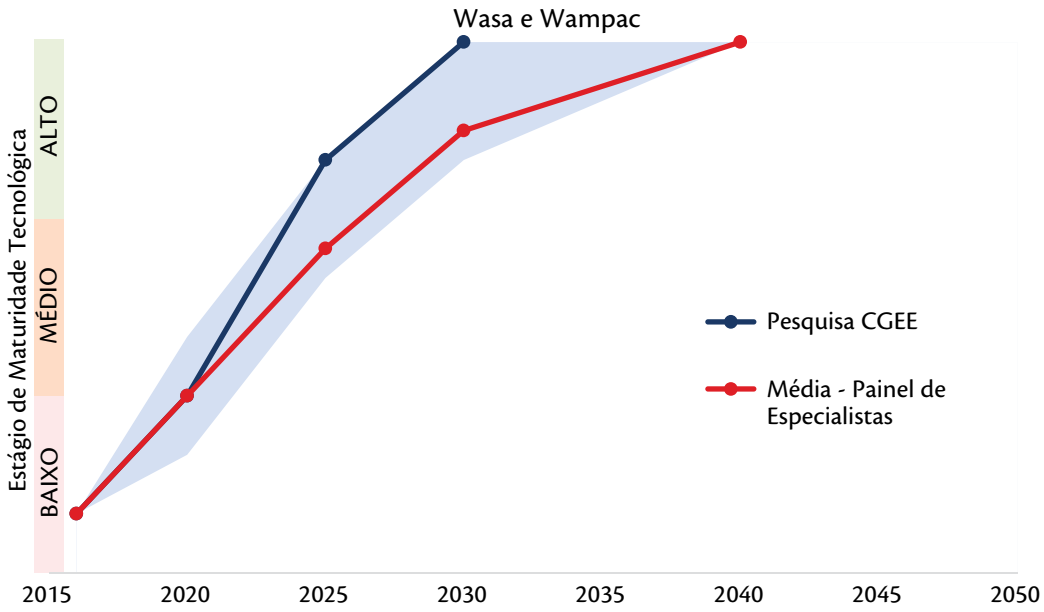

Gráfico 88 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Wasa e Wampac

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das rotas são apresentados na Tabela 53.

Tabela 53 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Wasa e Wampac

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Estratégias e Sistemas de Monitoramento, Controle e Proteção de Área Ampla	Wasa e Wampac	Fatores portadores de futuro	Sistema de supervisão e controle (Reger)	Aplicações em avaliação dinâmica da segurança em tempo real		Utilização de modernas tecnologias de TIC ao monitoramento, controle, proteção e automação do SIN	Formação de equipes interdisciplinares	
		Maturidade	BAIXO		ALTO			

Fonte: Elaboração própria.

11.3.2. Temática novas tecnologias de suporte à tomada de decisões no Sistema Interligado Nacional (SIN)

Roadmap tecnológico

Rota - Novas estratégias e metodologias de suporte à tomada de decisões

A presente rota encontra-se em estado inicial no País, assim como na maioria dos países do mundo. Trata-se de desenvolvimento recente visando à integração de informações de várias fontes para permitir uma visão geral do estado operativo do sistema interligado, ou permitir a chamada Consciência Situacional (*Situational Awareness*), capaz de antecipar situações potencialmente catastróficas para o sistema e indicar possíveis caminhos de mitigação. Apoia-se fortemente nas tecnologias de Wasa e Wampac incluídas na temática anterior, porém vai além, pela incorporação de outras informações tais como informações meteorológicas, comportamentais, socioambientais etc., combinadas com tecnologias de informações poderosas como Big Data, Métodos Cognitivos, IoT e Computação em Nuvens. Embora incipiente no País, o Brasil possui grande potencial de desenvolvimento nessa área por contar com pessoal qualificado no tema, não necessariamente ligado ao setor elétrico.

A presente rota representa a introdução das mais modernas tecnologias de TIC ao monitoramento, controle, proteção e automação do SIN. Sua evolução deverá ser mais acentuada a partir de 2030 e o ritmo no qual essa evolução se dará é difícil de prever. Apesar de ser um desenvolvimento para o futuro, é importante que pesquisadores e engenheiros brasileiros atuantes no setor elétrico iniciem um processo de colaboração com profissionais das áreas de TIC para formar equipes interdisciplinares capazes de enfrentar os desafios dessa rota tecnológica, cuja evolução pode ser observada no Gráfico 89.

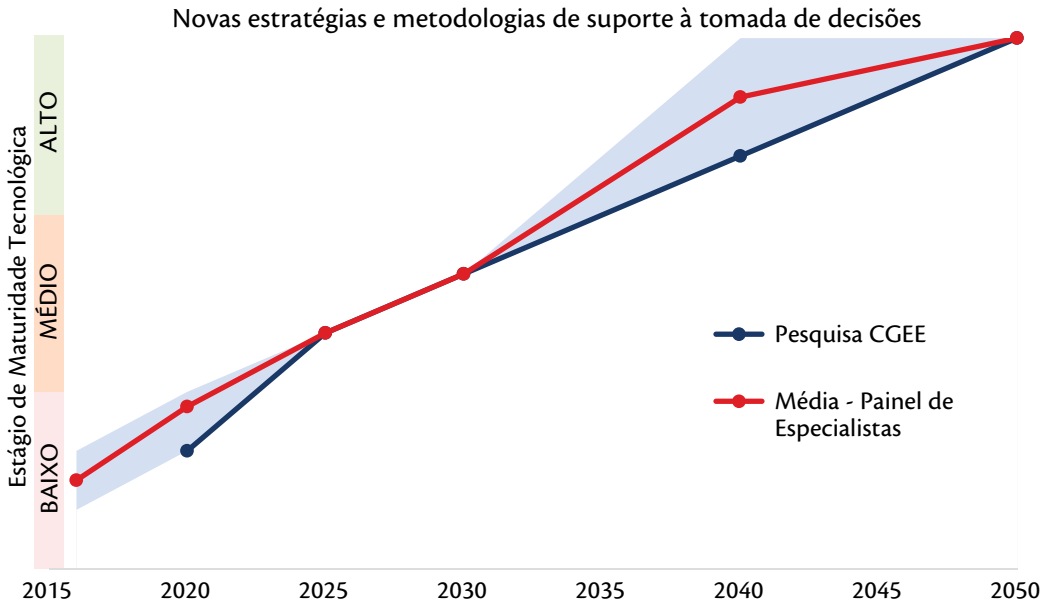

Gráfico 89 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Estratégias e Metodologias de Suporte à Tomada de Decisões

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das rotas são apresentados na Tabela 54.

Tabela 54 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Estratégias e Metodologias de Suporte à Tomada de decisões

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Novas Tecnologias de Suporte à Tomada de Decisões no SIN	Novas Estratégias e Metodologias de Suporte à Tomada de Decisões	Fatores portadores de futuro	Disseminação do conhecimento de outras áreas para o setor elétrico		Evolução das tecnologias Wasa e Wampac	Utilização das tecnologias Wasa e Wampac Incorporação de informações externas (informações meteorológicas, comportamentais, socioambientais) Integração com Big Data, Métodos Cognitivos, IoT e Computação em Nuvem		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

11.3.3. Temática sensoriamento, medição e monitoramento

Roadmap tecnológico

Rota - Sensoriamento e monitoramento avançados em funções de geração e transmissão

Esta rota tem mostrado desenvolvimento razoável no País. Vários centros universitários e de pesquisas têm desenvolvido protótipos de dispositivos para a monitoração de geradores, transformadores, linhas de transmissão etc., por meio de projetos de P&D gerenciados pela Aneel. O Cepel, em particular, desenvolveu tecnologia específica para o monitoramento de transformadores e geradores. Na área de redes de PMU, a empresa Reason, recentemente incorporada pela GE/Alstom, desenvolveu equipamento para mediação fasorial sincronizada, concentradores e equipamentos para oscilografia em geral.

O desenvolvimento na área de sistemas de monitoramento (*software*) está maduro, prevendo-se uma evolução natural nas próximas décadas. No que diz respeito a dispositivos e equipamentos para sensoriamento e monitoração, há incerteza na evolução da rota. Como anteriormente referido, esta

vertente do processo depende da participação da indústria nacional. Algumas iniciativas, como a da empresa Reason citada, mostram que existem condições para esse desenvolvimento, porém, como tem sido observado em outras áreas tecnológicas, a resposta do setor industrial brasileiro às questões de inovação tem sido abaixo do esperado. A evolução da rota pode ser observada no Gráfico 90.

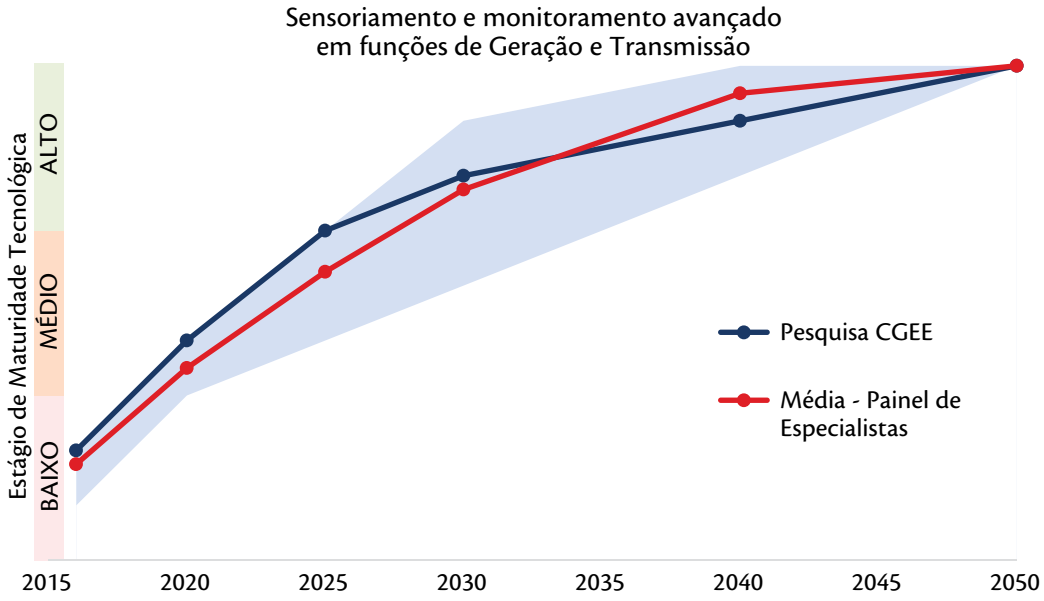

Gráfico 90 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sensoriamento e Monitoramento Avançado em Funções de Geração e Transmissão

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das rotas são apresentados na Tabela 55.

Tabela 55 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sensoriamento e Monitoramento Avançado em Funções de Geração e Transmissão

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Desenho de Mercado	Segurança patrimonial, segurança cibernética e infraestrutura computacional para o suporte à transferência e ao gerenciamento de grandes volumes de dados	Fatores portadores de futuro	Interface com outras áreas de conhecimento (petróleo e gás, telecomunicações, sistema bancário)		Controle e interação de grande base de dados	Apresentação de um padrão internacional		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

11.3.4. Temática integração de sistemas de tecnologia de informação e comunicação (TIC)

Roadmap tecnológico

Rota - Segurança patrimonial, segurança cibernética e infraestrutura computacional para o suporte, a transferência e o gerenciamento de grandes volumes

A introdução de técnicas de segurança patrimonial e cibernética, assim como a segurança e a confiabilidade no processamento de grandes bancos de dados, deverá crescer rapidamente no setor elétrico até o horizonte de 2030, seguindo a tendência observada em outros países, preocupados com os efeitos catastróficos que o setor elétrico pode sofrer por ações externas e internas indevidas. A

partir dessa data, quando o SEB já apresentar um padrão internacional nessas áreas, o desenvolvimento deverá ter uma evolução mais suave.

As tecnologias presentes nesta rota são comuns a várias áreas de infraestrutura como as de petróleo e gás, telecomunicações, segurança, sistema bancário etc. A manipulação de grandes bancos de dados, cujo acesso indevido ou a adulteração possam significar grandes perdas e até mesmo o início de processos catastróficos, é uma preocupação fundamental para a moderna sociedade da informação. Desta forma, o desenvolvimento dessa área nas aplicações em sistemas elétricos deve evoluir em sincronismo com os avanços nas outras áreas, sendo absorvidos e adaptados os avanços já obtidos. Esta rota evidencia a necessidade de grande interação das equipes de desenvolvimento da tecnologia de sistemas de supervisão, controle e automação da área elétrica com os mais recentes avanços na área de TIC. A evolução da rota pode ser observada no Gráfico 91.

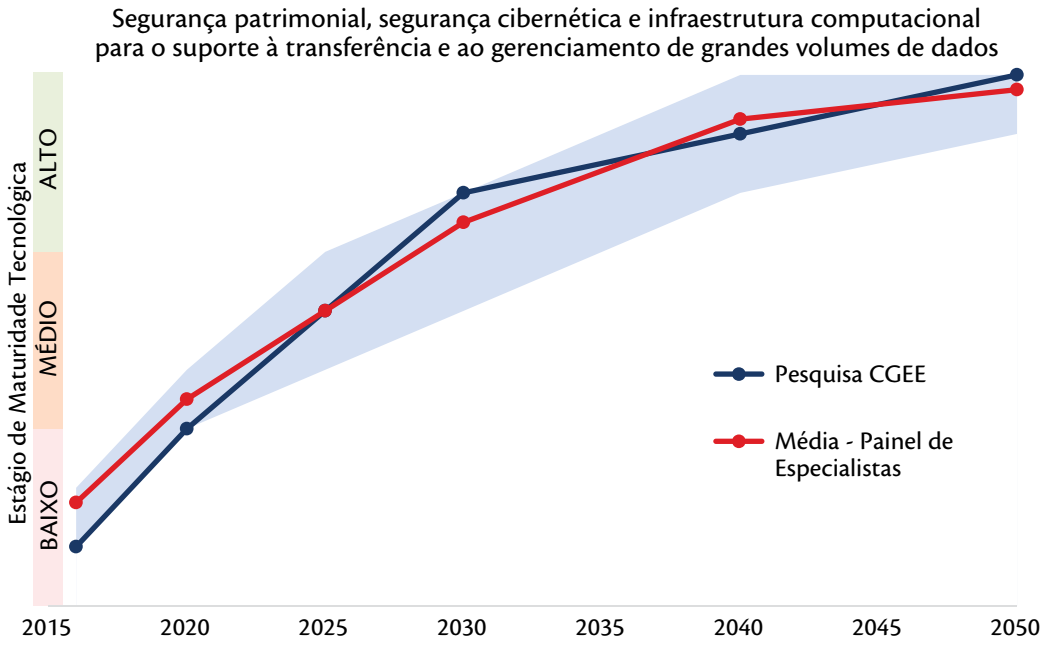

Gráfico 91 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Segurança Patrimonial, Segurança Cibernética e Infraestrutura Computacional para o Suporte à Transferência e ao Gerenciamento de Grandes Volumes de Dados

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade das rotas são apresentados na Tabela 56.

Tabela 56 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Segurança Patrimonial, Segurança Cibernética e Infraestrutura Computacional para o Suporte à Transferência e ao Gerenciamento de Grandes Volumes de Dados

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Integração de Sistemas de Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC)	Segurança patrimonial, segurança cibernética e infraestrutura computacional para o suporte à transferência e ao gerenciamento de grandes volumes de dados	Fatores portadores de futuro	Interface com outras áreas de conhecimento (petróleo e gás, telecomunicações, sistema bancário)		Controle e interação de grande base de dados	Apresentação de um padrão internacional		
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO	ALTO		

Fonte: Elaboração própria.

11.3.5. Temática integração de redes elétricas inteligentes da geração/ transmissão

Roadmap tecnológico

Rota - Desempenho da rede elétrica no contexto de elevada penetração de fontes variáveis e de reduzida inércia

Na medida em que as fontes eólicas e solar aumentam a sua participação na matriz elétrica do sistema brasileiro, a questão de reduzida inércia das fontes passa a ser mais relevante. Os compromissos assumidos pelo Brasil na COP21 indicam que por volta de 2030 o uso de energia de novas fontes renováveis deve atingir 33% da demanda, sendo uma parte substancial de geração eólica e solar. Portanto, o problema é real e deve ser atacado imediatamente. Dado a adequada capacitação nacional nas áreas ser relevante a este tema (eletrônica de potência e sistemas avançados de controle), o País

tem condições de desenvolver rapidamente essa área, podendo utilizar a experiência já adquirida por países nos quais a penetração de geração eólica é grande.

A crescente participação das novas fontes renováveis de energia no SIN introduz a questão técnica de operar um sistema elétrico com fontes com reduzida inércia (eólica) ou praticamente nenhuma inércia (fotovoltaica). Efeitos diretos no controle automático da geração, controle de frequência e possíveis instabilidades levantam questões complexas para a operação do sistema interligado. A solução desses problemas encontra-se na interseção de duas áreas de conhecimento: a eletrônica de potência e os sistemas avançados de controle. As fontes eólica e fotovoltaica são, em geral, conectadas à rede elétrica via inversores que podem ser utilizados para introduzir uma *inércia artificial* no sistema, permitindo a sua utilização para mitigar os problemas acima levantados. Destaque-se, também, a necessidade de maior integração dos sistemas de supervisão e controle em nível sistêmico com os centros de controle das unidades geradoras, visando à troca de informações rápidas e confiáveis, particularmente relacionadas às possíveis variações bruscas de geração eólica e solar. A evolução da rota pode ser observada no Gráfico 92.

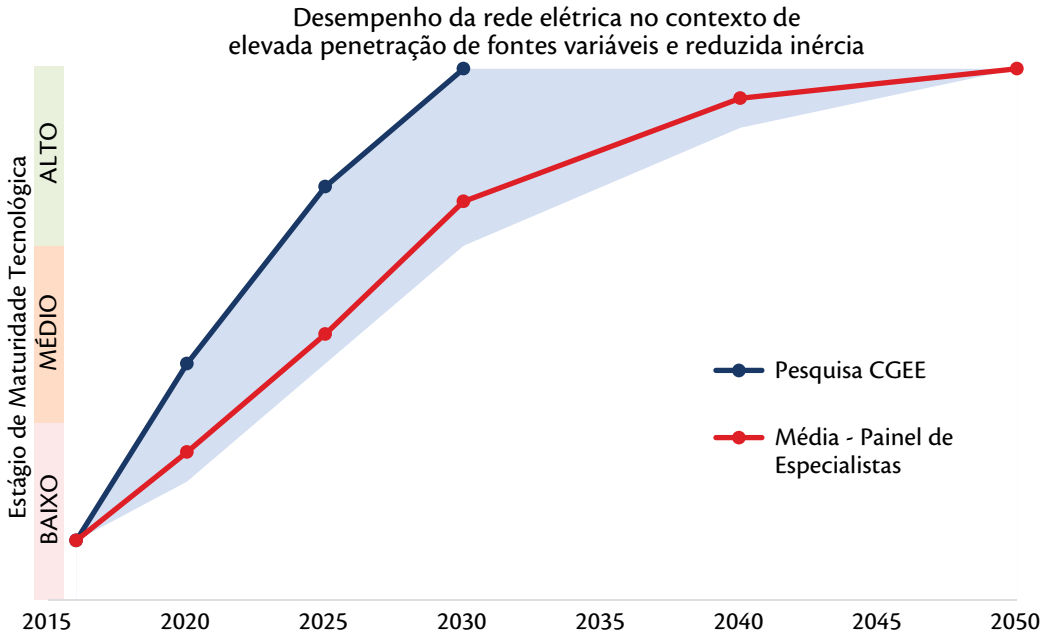

Gráfico 92 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desempenho da Rede Elétrica no Contexto de Elevada Penetração de Fontes Variáveis e Reduzida Inércia

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a Evolução da maturidade tecnológica da rota são apresentados na Tabela 57.

Tabela 57 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desempenho da Rede Elétrica no Contexto de Elevada Penetração de Fontes Variáveis e Reduzida Inércia

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Integração de Redes Elétricas Inteligentes da Geração/Transmissão	Desempenho da rede elétrica no contexto de elevada penetração de fontes variáveis e reduzida inércia	Fatores portadores de futuro	Intensificação de fontes eólicas e solar na matriz elétrica		Efeitos diretos no controle automático da geração, controle de frequência e possíveis instabilidades levantam questões complexas para a operação do sistema interligado		Desenvolvimento de eletrônica e sistemas avançados de controle Integração dos sistemas de informação e controle em nível sistêmico com centros de controle das unidades geradoras	
		Maturidade	BAIXO	MÉDIO	ALTO			

Fonte: Elaboração própria.

11.3.6. Temática integração de redes elétricas inteligentes da transmissão/ Distribuição *Roadmap* tecnológico

Rota - Desempenho da rede elétrica no contexto de elevada penetração de geração distribuída e esquemas de gerenciamento da demanda na distribuição

A crescente inserção de geração distribuída conectada aos sistemas de distribuição é uma tendência observada no mundo e também no Brasil. Ainda incipiente no País, mas já presente em vários países, os sistemas de gerenciamento da demanda devem ser aqui também implementados em breve para compensar a intermitência das fontes eólica e solar, e a maior imprevisibilidade das hidrelétricas causada pelas mudanças climáticas. As Bandeiras Tarifárias e a Tarifa Branca representam o início dessa

implementação. Outro aspecto a considerar para o futuro são as tecnologias de armazenamento, as quais estão atingindo a maturidade e devem ser aqui também utilizadas em breve. Todas essas tecnologias respondem pela denominação genérica de Recursos Energéticos Distribuídos e, juntamente com as tecnologias de *Smart Grid*, produzem uma alteração substancial na operação dos sistemas de distribuição. Desta forma, a operação dos sistemas interligados tem que levar em consideração essas inovações no planejamento da expansão, da operação e do controle em tempo real.

Tendo em vista a rápida penetração de recursos energéticos distribuídos nas redes de distribuição, existe a necessidade de um rápido desenvolvimento da rota para permitir um adequado funcionamento do sistema interligado frente às alterações nas características de operação dos sistemas de distribuição. O País possui pessoal qualificado, tanto no setor acadêmico quanto no industrial, para enfrentar essa necessidade. Entretanto, de uma forma geral, sente-se a necessidade de uma reciclagem das equipes das empresas de energia nessas novas tecnologias. A evolução da maturidade pode ser observada no Gráfico 93.

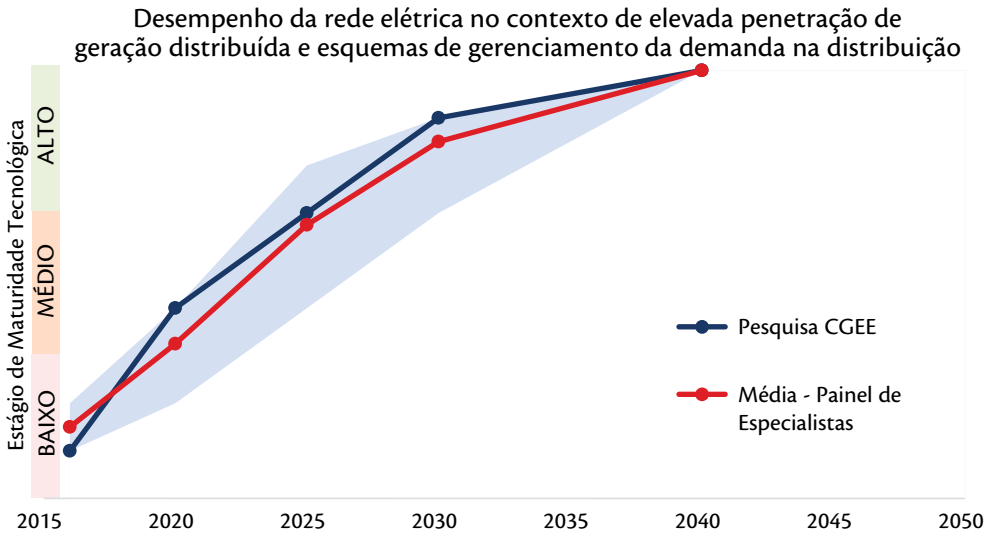

Gráfico 93 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desempenho da Rede Elétrica no Contexto de Elevada Penetração de Geração Distribuída e Esquemas de Gerenciamento da Demanda na Distribuição

Fonte: Elaboração própria.

Rota - Gerenciamento da informação e das ações dos centros de operação de distribuição com os centros de controle do sistema interligado

Esta rota está em fase inicial de desenvolvimento no País, porém necessita de aceleração no processo evolutivo para permitir um atendimento adequado das necessidades. Exige a ação de mecanismos de coordenação entre a operação do sistema interligado (ONS) e as distribuidoras. Organismos específicos para essa organização necessitam ser definidos.

A interação requer uma integração dos sistemas computacionais envolvendo o acesso direto das informações com todos os problemas inerentes a esse tipo de processo: interoperabilidade, protocolos, segurança cibernética etc. Além disso, as funções como controle automático da geração, estimação de estado, previsão da demanda e avaliação *online* da segurança devem ser adaptadas para essa operação conjunta. A evolução de maturidade pode ser observada no Gráfico 94.

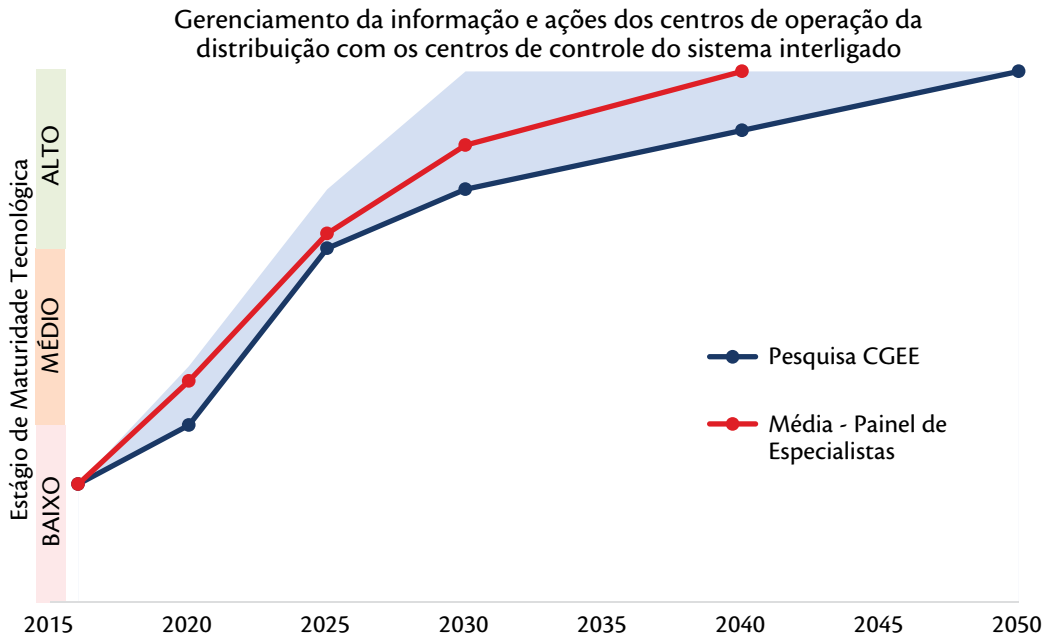

Gráfico 94 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Gerenciamento da Informação e Ações dos Centros de Operação de Distribuição com os Centros de Controle do Sistema Interligado

Fonte: Elaboração própria.

Os fatores portadores de futuro que aportam a evolução da maturidade tecnológica da rota são apresentados na tabela 58.

Tabela 58 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desempenho da Rede Elétrica no Contexto de Elevada Penetração de Geração Distribuída e Esquemas de Gerenciamento da Demanda na Distribuição e no Gerenciamento da Informação e Ações dos Centros de Operação da Distribuição com os Centros de Controle do Sistema Interligado

Temática	Rota	Dado	Período					
			2016	2020	2025	2030	2040	2050
Temática Integração de Redes Elétricas Inteligentes da Transmissão/Distribuição Roadmap Tecnológico	Desempenho da rede elétrica no contexto de elevada penetração de geração distribuída e esquemas de gerenciamento da demanda na distribuição	Fatores portadores de futuro	Inserção de Geração Distribuída na Rede		Reciclagem de equipe técnica, ante as novas tecnologias Tecnologias de armazenamento			
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	
	Gerenciamento da informação e ações dos centros de operação da distribuição com os centros de controle do sistema interligado	Fatores portadores de futuro	Mecanismos de coordenação entre a operação do sistema interligado e as distribuidoras		Integração dos sistemas computacionais		Operação Conjunta	
		Maturidade	BAIXO		MÉDIO		ALTO	

Fonte: Elaboração própria.

11.4. Priorização

Será apresentada neste item a ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática. Conforme mencionado na metodologia (ver livro "Evolução Tecnológica Nacional no Segmento de Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia") , 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 59.

Tabela 59 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Redes Elétricas Inteligentes no SIN

Prioridade	Rota Tecnológica	Temática
1	Novas estratégias e metodologias de suporte à tomada de decisões	Novas Tecnologias de Suporte à Tomada de Decisões no SIN
2	Wampac	Estratégias e Sistemas de Monitoramento, Controle e Proteção de Área Ampla
3	Sensoriamento e monitoramento avançados em funções de geração e transmissão	Sensoriamento, Medição e Monitoramento
4	Desempenho da rede elétrica no contexto de elevada penetração de fontes variáveis e de reduzida inércia	Integração de REI da Geração/Transmissão
5	Desempenho da rede elétrica no contexto de elevada penetração de geração distribuída e esquemas de gerenciamento da demanda na distribuição	Integração de REI da Transmissão/Distribuição
6	Segurança patrimonial, segurança cibernética e infraestrutura computacional para o suporte à transferência e ao gerenciamento de grandes volumes de dados	Integração de Sistemas de Tecnologia de Informação e Comunicação (TIC)
7	Gerenciamento da informação e ações dos centros de operação da distribuição com os centros de controle do sistema interligado	Integração de REI da Transmissão/Distribuição

Fonte: Elaboração própria.

As duas primeiras rotas tecnológicas alcançaram priorização quase igual nas discussões, ocupando os primeiros lugares por constituírem-se no núcleo básico da macrotemática. A escolha da rota Novas Estratégias e Metodologias de Suporte à Tomada de Decisões como a primeira da lista deveu-se ao fato de que ela tem um caráter mais abrangente que a segunda.

A escolha da rota Sensoriamento e Monitoramento Avançado em Funções de Geração e Transmissão deveu-se ao fato de que ela fornece os recursos básicos para a implantação das demais tecnologias.

As rotas escolhidas nas prioridades 4 e 5 representam a integração das tecnologias aplicadas ao sistema de transmissão com a geração e distribuição. Têm, portanto, um caráter complementar em relação às demais.

Finalmente, as rotas 6 e 7, embora importantes no contexto geral, representam extensões do núcleo central da macrotemática.

Referências

Referências bibliográficas

ABB. **Current developments in high-voltage switchgear** - Some examples. Switzerland: 2015. Disponível em: < http://sccer-furies.epfl.ch/files/content/sites/sccerfuries/files/ Document/62_Holaus(ABB)_SCCER-FURIES_20151125.pdf>

_____. **Instrument transformers** - application guide. Ludvika, Sweden: 2009. 134p. Disponível em: < https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source= web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjQq8-H8-DUAhVMNT4KHZ4wC9s QFggnMAA&url=https%3A%2F%2Flibrary.e.abb.com%2Fpublic%2F94c2ba5a2f381077c1257df000504e0c%2F1HSM%25209543%252040-00en%2520IT%2520Application%2520Guide%2520Ed4.pdf&usg=AFQjCNGhhs2j5a4O20ppwkOVmzXR72FjNQ>

_____. **Phase-shifting transformers** - Applications and technology. Ludvika, Sweden: *oct.* 2016. Disponível em: < https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s& source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjE1Y-U9ODUAhVMPT4KHQVXAY YQFggsMAA&url=http%3A%2F%2Fnew.abb.com%2Fproducts%2Ftransformers%2Fpower%2Fsystem-intertie-transformers%2Fphase-shifting&usg=AFQjCNFoquKBOv0PBsXe K5SPtmTLwbXT2Q>

ADAMIAK, M. **Standard protocols and common data formats**. Invited Paper # 08, PAC World 2010 Conference, Dublin IE, June 2010.

ADAMIAK, M.; LEITLOFF, V.; ORDACGI F., J.M. et al. **Coordination of protection and automation for future networks.** WG B5.43, SC B5 - Protection and Automation, (CIGRÉ Brochure 629), 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração.** Disponível em: < http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/ capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>

_____. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST.** Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica, Rev. 7 ed., 2015. Data de Vigência: 01/01/2017. Disponível em: < http://www.aneel.gov.br/modulo-8 >.

AKHIL, A.A.; HUFF, G.; CURRIER, A.B.; KAUN, B.C.; RASTLER, D.M.; CHEN, S.B.; COTTER, A.L.; BRADSHAW, D.T.; GAUNTLETT, W.D. **DOE/EPRI electricity storage handbook in collaboration with NRECA,** SANDIA REPORT, SAND2013-5131. fev. 2015. 347 p. Disponível em: < http://www.sandia.gov/ess/publications/SAND2015-1002.pdf>.

ALAVI, O. Current measurement with optical current transformer. **Journal of World's Electrical Engineering and Technology**, apr. 2015, p. 29-35.

ALI, M.H.; TAMURA, J.; WU, B. SMES Strategy to minimize frequency fluctuations of wind generator system. In: **IECON 2008: Industrial Electronics**. Annual Conference of IEEE, 34th. nov. 2008.

ALI, M.H.; WU, B.; DOUGAL, R.A. An overview of SMES applications in power and energy systems. **IEEE Transactions of Sustainable Energy**, v.1, n.1, Apr. 2010, p. 38-47.

ALTUVE F., H.J.; SCHWEITZER III, E.O. **Modern solutions for protection, control and monitoring of electric power systems.** Chapters 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13 and 14, Schweitzer Engineering Laboratories Inc., 2010.

_____. **Modern solutions for protection, control and monitoring of electric power systems.** Chapter 3, Schweitzer Engineering Laboratories Inc., 2010.

ALVES, R.M.; GOMES JR., S.; AVELEDA, A.; BORGES, C.L.T.; TARANTO G.N.;, FALCÃO, D.M.; ASSIS, T.M.L.; HENRIQUES, R.M.; PASSOS FILHO, J.A. Static and Dynamic security assessment of large power systems for online and offline applications. **Eletroevolução**, Cigrè-Brasil, v. 77, p. 40-46, 2014.

ANDERS, G.J. **Rating of electric power cable: ampacity computations for transmission, distribution, and industrial applications.** S.l.: IEEE, 1997. 428 p.

ANDRADE, R. de et al. Flywheel energy storage system description and tests. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** v. 17, n. 2, p. 2154-2157, Jun 2007.

ANDRADE, R. de et al. Voltage sags compensation using a superconducting flywheel energy storage system. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 15, n. 2, p. 2265-2268, Jun 2005.

APOSTOLOV, A. Improving the protection of distribution systems with DERs. **Protection, Automation and Control World Magazine**, Mar. 2015.

_____. Integration of distributed energy resources. **Protection, Automation and Control World Magazine**, Sept. 2013. p. 18-25.

BARBOSA, F.B.; SILVA, A.N. DA; MARTINS, H.J.A.; MACHADO, I.L. DE; BRAGA, P.R.O.; OLIVEIRA, M.J.S. Diagnóstico de campo e laboratorial na avaliação de para-raios. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17., 2006. **Trabalho apresentado...** 2006.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media.** S.l.: Dove Ed, 800 p.

BEAUGUITTE, D.; YAHYAOUI, H.; NOTINGHER, P.; AGNEL, S.; KIEFFEL, Y. Dielectric properties of polyethylene terephtalate submitted to long-term thermo-electrical ac stress. IEEE ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2012. **Proceedings...** 2012.

BOENIG, H.J.; HAUER, J.F. Commissioning tests of the bonneville power administration 30 mj superconducting magnetic energy storage unit. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-104, n. 2, p. 302-312, Feb. 1985.

BOUNA, R.W.L.; URANUS, H.P. Analysis of the effect of rainfall intensity in Jakarta and Tangerang to the

performance of free space optics communication system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE on Electrical Engineering and Informatics, Bandung, Indonesia: jul. 2011. **Proceedings...** Bandung, Indonesia: 2011.

BRAND, K-P. Substation automation evolving. In: PAC World 2010 Conference, Dublin (IE), June 2010. **Invited Paper # 18**, 2010.

BRAND, K-P.; LOHMANN, V.; WIMMER, W. **Substation automation handbook**. S.l.: Utility Automation Consulting Lohmann, 2003.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI. **Redes Elétricas Inteligentes** - Diálogo Setorial Brasil-União Européia, nov. 2014.

BROOKS, S.; GELMAN, A.; JONES, G.L.; MENG, X.-L. **Handbook of Markov Chain Monte Carlo.** Boca Raton: CRC Press, 2011. 616 p.

BRUNNER, C. IEC 61850 - an Overview. In: PAC World 2010 Conference, Dublin (IE), June 2010. **Invited Paper # 18**, 2010.

BUCKLES, W.; HASSENZAHL, W.V. Superconducting magnetic energy storage. **IEEE Power Engineering Review**, v. 20, n. 5, p. 16-20, may. 2000.

CARRANDER, K.; BENGTSSON, C.; LORIN, P. A new monitoring concept for on-line transformers diagnostics, In: CONF. OF THE ELECTRIC POWER SUPPLY INDUSTRY, 13th Manila, Philippines, Oct. 2000. **Proceedings...** Manila: ABB T-Monitor, 2000.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE, **Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada, Energia eólica**. Brasília - DF: 2015. 248p. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/atividades/ redirect/9269>.

_____. **Redes Elétricas Inteligentes:** contexto nacional. 2012. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/busca/ConsultaProduto NcomTopo.php?f=1&idProduto= 8050>. Acesso em: set 2015.

_____. **Usos e aplicações de terras raras no Brasil: 2012-2030.** Brasília: 2013.254p. Disponível em: < http://www.cgee.org.br/atividades/redirect/8629>.

CIGRÉ. **International symposium of the electric power system of the future; Integrating supergrids and microgrids.** Bologna, Italy, 13-15 Sep. 2011. Disponível em: < http://www.cigre.org/content/download/1196/16031/version/1/file/Bologna_Call_ For_Papers.pdf >.

_____. **Overhead power lines,** Springer Verlag 2002.

_____. B3-212: **Substation automatic restoration system achieving drastic outage time reduction by optimized procedure**. SATO, T.; (Tokyo Electric Power Co., Inc.), TAIRA, T.; (The Kansai Electric Power Co., Inc.), KAWAKITA (Chubu Electric Power Co., Inc.), Japan.

_____. B5-103, CARE - **Interoperability challenge: Kahrama experience with substation automation.** AL-BAKER, I.; SASONO P. (Qatar General Electricity & Water Corporation). 2008.

_____. C2-101: **PMU application for ips/ups dynamic performance monitoring and study.** AYUEV, B.; EROKHINE, P.; KULIKOV, Y. SO-CDO for UES Russia. 2008

_____. C2- **On applications and quality of subsyncronous frequence components extracted from PMU measurement data**. RAUHALA, T.; SAARINEN, K.; KAUKONEN, T. Fingrid Oyj, Finland: 2008.

_____. C2-105: **Control centre applications of integrated wams-based dynamics monitoring and energy management systems**. WILSON, D.H.; HAY, K.; MACLAREN, R.F.B.; HAWKINS, D.J.; DUNN, A.; MIDDLETON, A.J.; CARTER, A.; HUN, W. UK United Kingdom: Psymetrix Limited, GE Energy, NationalGrid, 2008.

_____. C2-109: **Changing paradigms for increased productivity in power system restoration studies: the Brazilian ISO experience.** ALVES, F.R.M.; GUARINI, A.P.; HENRIQUE, R.M.; PASSOS FILHO, J.A.; MARTINS, N.; GOMES, D.M.P. Brazil: 2008.

_____. C3-102: **Climate change and its influence on the planning and operation of electric power system**. MOSER, C.; GNANSOUNOU, E.; BARBEN, R. Switzerland: 2008.

_____. WG 22.12: **The Thermal behaviour of overhead line conductor, TB 207**, STEPHEN. 2002.

_____. WG A3.10: **Application and feasibility of fault current limiters in power systems**, 2012. (CIGRE Technical Brochure, n. 497).

_____. WG B5.07: CARE Study Committee. **The automation of new and existing substations:** why and how, CARE Aug. 2003.

_____. WG C1.17: **Planing to manage power interruption events, TB 433.** BELL, K. 2010.

_____. WG C2.33: **Control center operator requirements, selection, training and certification, TB524**. Chukalevski. 2013.

_____. WG C2.31: **Joint and coordinated Development of operators in Control Centres from different Companies and Nacionalities.** SPANEL, U. Paris C2-206, 2008.

_____. WG D1.15, **Status of development and field test experience with high-temperature superconducting power equipment.** Paris: jun. 2010. (CIGRE Tech. Broch., n. 418).

_____. **Why procedure d by optimized existing substations need to be automated?** CARE colloquium Australia: 2003.

_____. Working Group D1.38: **Common characteristics and emerging test techniques for high temperature superconducting power equipment,** 2015. (CIGRE Technical Brochure n. 644).

CIGRE Brasil. Seção bienal 2016 - comite técnico, constatações técnicas. **Revista Electro Evolução,** n. 86, mar. 2017.

COOK, V. **Analysis of distance protection**. S.l.: Research Studies Press, John Wiley and Sons Inc., 1985.

COUTELIERIS, F.A.; DELGADO, J.M.P.Q. **Transport process in porous media.** Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2012. 236 p.

DANIEL, L.O.; POLASEK, A. Aplicações de SMES superconducting magnetic energy storage em sistemas de potência. In: SIMPÓSIO de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica SEPOPE, 13., Foz do Iguaçu, PR: 18 a 21 de Maio 2014. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: 2014

DAVIDSON, E.M. et al. Automated fault and disturbance analysis and its role in the *Smart Grid*. In: PAC WORLD 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 17**, Dublin IE, 2010.

DECKER, I.C.; DOTTA, D.; AGOSTINI, M.N.; ZIMATH, S.L. et al, Performance of a synchronized phasor measurements system in the brazilian power System. **Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting**, 2006.

DEEPTHIL, M.V.; SAMPATHKUMARAN, P.; SEETHARAMU, S.; VYNATHEYA, S.; SAILAJA, R.R.N. Development of HDPE/Silicon nitride nanocomposites using HDPE-g-Dibutyl maleate as compatibilizer", IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS, 10th., jul. 2012, Bangalore, India. **Proceedings...** 2012.

DE SOUSA, et. al. Limitadores de corrente de curto-circuito supercondutores - Principais conceitos e testes. **Revista Brasileira de Ensino de Fisica**, v. 34, n. 4, 4313, 2012.

DE SOUSA, W.T.B.; POLASEK, A.; MATT, C.F.T. et al. Recovery of superconducting state in an R-SCFCL MCP-BSCCO-2212 Assembly. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** v. 23, n. 1, p. 5601407, Feb. 2013.

DE SOUSA, W.T.B.; POLASEK, A.; DIAS, R. et al. Thermal-electrical analogy for simulations of superconducting fault current limiters. **Cryogenics,** v. 62, p. 97-109, Jul. 2014.

DE SOUSA, W.T.B.; ASSIS, T.M.L.A.; POLASEK, A.; MONTEIRO, M.; ANDRADE, Jr., R. de. Simulation of a superconducting fault current limiter: A case study in the brazilian power system with possible recovery under load. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** v. 20, n. 20, p. 1-8, dez. 2015.

DIAMANTOULAKISB, P.D.; KAPINASB, V.M.; KARAGIANNIDISA, G.K. Big Data analytics for dynamic energy management in *Smart Grids*. **Big Data Research**, v. 2, Is. 3, Sept. 2015.

DIAS, D.H.N. **Modelagem de mancais lineares supercondutores considerando o resfriamento na**

presença de campo. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

DIAS, D.H.N. et al. Characterization of a second generation hts coil for electrical power devices. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 25, n. 3, p. 1-4, Jun. 2015a.

DIAS, F.J.M. **Avaliação das características elétricas e magnéticas de bobinas supercondutoras, levando em consideração algumas configurações de isolamento,** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) - Universidade Federal Fluminense, 2015b.

EKANAYAKE, J.; Liyanage, K.; Wu, J.; Yokoyama, A.; Jenkins, N. ***Smart Grid*: Technology and Applications.** Wiley: 2012.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE - EPRI. **AC Transmission line reference book-200 kV and above.** 3.ed. 2005.

_____. **Electric energy storage technology options: a white paper primer on applications, costs and benefits**. Palo Alto, CA: 2010. (Technical Update Report n. 1020676).

_____. **Program on technology innovation:** Modeling of SMES and its integration to the power grid. October 2005. (Technical Update Report n. 1012153).

_____. **Sensor technologies for a smart transmission system**. An EPRI White Paper, 2009. Disponível em: < http://energy.gov/oe/downloads/sensor-technologies-smart-transmission-system>.

THE ELECTRICITY COUNCIL. **Power System Protection**. v. 1, 2 and 3, Peter Peregrinus Ltd., 1981.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano decenal de energia 2023**. PDE 2023. Brasília: 2014.

_____. Nota Técnica DEA 13/15: **Demanda de energia 2050** - Série Estudos da demanda de energia. jan. 2016. Disponível em: < http://www.epe.gov.br/Estudos/ Documents/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>. Acesso em: 02 mar.2017.

_____. **Plano decenal de expansão da energia 2024**, Sumário. PDE 2024. Brasília: 2015.

_____. Nota Técnica DEA XX/15: **Cenário econômico 2050**. set. 2015.

FERMI, E. **Thermodynamics.** S.l.:Important Books, 2013. 142p.

FRONTIN S. et al. **Equipamentos de alta tensão**; Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília. Goya, 2013.

GEC Measurements. **Protective relays application guide.** 2.ed. 1975.

GENERAL ELECTRIC. **IEC Oil filled & SF-6 gas current transformers.** 2014.

GERHOLD, J. **Cryogenic liquids** - A prospective insulation basis for future power equipment. IEEE, 2002.

_____. Potential of cryogenic liquids for future power equipment insulation. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 9, n. 6, 2002.

GLASSON, N.D. et al. Test results and conclusions from a 1 MVA superconducting transformer featuring 2G HTS Roebel cable. IEEE **Transactions on Applied Superconductivity**, v. 27, n. 4, p. 1-5, Jun. 2017.

GLASSON, N.D.; STAINES, M.P.; JIANG, Z.; ALLPRESS, N.S. Verification testing for a 1 MVA 3-phase demonstration transformer using 2G-HTS Roebel cable. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 23, n. 3, p. 5500206-5500206, Jun. 2013.

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL - GWEC. **Global wind report: annual market update 2011**. Bruxelas: 2012.

GRICE, A.; PEER, J.M.; MORRIS, G.T. **Envelhecimento da força de trabalho atual.** Quem vai Substituí-la? Trad.do artigo de Tacoma Power e Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2010.

GUPTA, R. et al. Design, construction, and testing of a large-aperture high-field HTS SMES coil. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 26, n. 4, p. 1-8, Jun. 2016.

HANAI, M.; OKABE, S. **The largest scale dielectric tests of UHV gas circuit breaker.** CIGRE WG D1-33-2, Budapest 2009.

HASSENZAHL, W. et al. Electric power applications of superconductivity. **Proceedings of the IEEE,** v. 92, n. 10, oct. 2004, p. 1655-1674.

HATZIARGYRIOU, M. et al. CIGRE WG: Network of the Future"; electricity supply systems of the future. **Electra,** n. 256. jun. 2011. Disponível em: < http://www.ho-cired.hr/2013/CIGRE-WG-Network-of-the-Future-Electra-lipanj-2011.pdf >

HAYAKAWA, N.; KOJIMA, H.; HANAI, M.; OKUBO, H. Recent progress in electrical insu-lation techniques for HTS power apparatus. **Physics Procedia,** v. 36, p. 1305-1308, 2012.

HE, Y. Development of high voltage and high power technology in China from 1949 to 2003. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 21, n. 6, 11/12, 2005.

HENVILLE, C. Multifunctional protection IEDs - How much functionality is too much? In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin (IE), June 2010. **Invited Paper # 10**. 2010.

HILL, T.L. **An introduction to statistical thermodynamics**. S.l.: Dover publications, 1987. 544 p. (Dover Books on Physics).

HOROWITZ, S.; APOSTOLOV, A. Adaptive protection of electric power systems. In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 12.** 2010.

HOSSENLOPP, L. Substation Automation System Engineering. In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 23.** 2010.

HROBATA, P.; PAPIC, I. An oscilloscope method for eliminating the interference and disturbance voltages for the earthing measurements of large earthing systems in substations., **Electric Power Systems Research,** EPSR-3146, 2010.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **High temperature superconductivity: a *roadmap* for electric power sector applications,** 2015-2030, Oct. 2015. Disponível em: < https://www.iea.org/media/impag/HighTemperatureSuperconductivityA*Roadmap* fortheElectricPowerSectorFINALExecSum.pdf>. Acesso em: abr. 2017.

JANSSEN, M.C. *Smart Grid* - What is it? In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 2.** 2010.

JARDIM, J.L. Online dynamic security assessment. In: **Real-time stability in power systems**, S.C Savulescu ed., Springer, 2014.

JARDINI J. et al. **Alternativas não convencionais para a transmissão de energia elétrica** - Estado da arte. Brasília: Goya. 2011

_____. **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão.** Brasília: Goya, 2010.

JIN, J.X. **Developments of SMES devices and potential applications in *Smart Grids***, IEEE PES Innovative *Smart Grid* Technologies. Conference ISGT ASIA 2012.

KALSI, K. Integrated transmission and distribution control. **Pacific Northwest National Laboratory Report** n. 22157, 2013. Available at: < http://www.pnnl.gov/main/ publications/external/../PNNL-22157.pdf>.

KASZTENNY, B.; FISCHER, N. advanced protection, automation, and control functions. In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 11**, 2010.

KHAN, Y.Z.; AL-ARAINY, A.A.; MALIK, N.H.; QURESHI, M.I. Effect of thermo-electrical stresses and ultra-violet radiation on polymeric insulators. **Final Research Report No. EE-18/26/27**, King Saud University, oct. 2006.

KINDERSBERGER, J.; WINDMAR, D.; AGORIS, D.; BÄRSCH, R.; BEISELE, C.; BROCARD, E.; GEORGE, C.; GORUR, R.; GUBANSKI, S.; HAVERKAMP, W.; HENRIKSEN, M.; JANSSEN, H.; KOMANSCHEK, B.; KORNMANN, X.; KURRAT, M.; LEUCI, C.; LUMB, C.; MACEY, R.; MÄHÖNEN, P.; MASSEN, U.;

LAMES, M.W.J.; SCHNEIDER, H.; SPALDING, M. Performance of uprated substations in contaminated environments. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n.4, out. 1998, p 1143- 1156.

KNOCK, C.; HORSFALL, I.; CHAMPION, S.M. Development of a computer model to predict risks from an electrical bushing failure. **Electric Power Systems Research,** v.103, 2013, p. 86-91.

KUNSMAN, S.; Braendle, M. Cyber security for substation automation, protection and control systems. In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 09**, 2010.

LARBALESTIER, D.; GUREVICH, A.; FELDMANN D.M.; POLYANSKII, A. High-Tc superconducting materials for electric power applications. **Nature,** v. 414 p. 368-377, 2001.

LEE, S.R.; LEE, J-J.; YOON, J. Protection scheme of a 154-kV SFCL test transmission line at the KEPCO Power Testing Center. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 27, Is. 4, 2017.

LEVY, A.F.S.; CARVALHO, A.T. DE; AMORIM JUNIOR, H.P.; OLIVEIRA FILHO, O.; NASCIMENTO, L.F.A. Desenvolvimento e Implementação de um sistema integrado de medição de descargas parciais e fator de perdas on-line em transformadores de potência na ELETRONORTE. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON POWER TRANSFORMERS, Recife, Brasil, mar. 2006. **Proceedings...** 2006.

LUKSZO, Z.; DECONINCK, G.; WEIJNEN, M.P.C. eds., **Securing Electricity Supply in the Cyber Age**, Springer, 2010.

MACHADO JR, P.P. **Comparação entre protótipo de transformador supercondutor e convencional em pequena escala.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense, 2015.

MACKEY M.The Future of electricity - PAC challenges of today and tomorrow towards the flexible grid. In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 1**, 2010.

MAFRA, J. **Pirâmide de Consumidores**. contribuição para a equipe de distribuição.

MARCHIONINI, B.G.; YAMADA, Y.; MARTINI, L.; OHSAKI, H. High temperature superconductivity: a *roadmap* for electric power sector applications, 2015-2030. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** 2017.

MASON, C.R. **The Art and science of protective relaying.** Chp. 1, John Wiley and Sons Inc., 1956.

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY - MIT. **The Future of the electrical grid;** An indisciplinary study, 2011.

MATTOS, L.S.; RODRIGUEZ, E.; COSTA, F.; SOTELO, G.G.; ANDRADE R. DE; STEPHAN, R.M. MagLev-Cobra operational tests. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 26, n. 3, p. 1-4, Apr. 2016.

MCDONALD, J.D. **Electric power substations engineering.** 2.ed, CRC Press: 2007.

MELLO, D.R. DE; OLIVEIRA FILHO, O.; CARDOSO, J.A.; AZEVEDO, R.M. DE; CARVALHO, S.G. Melhoria do desempenho de isoladores utilizados em subestações classe 800 kV sob chuva intensa. In: SEMINÁRIO NACIONAL de PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SNPTEE), 21., 2011. **Anais...** 2011.

MENDES, J.C.; MARCONDES, R.A.; REIS, A.S.; DOMICIANO C.; MOTTA JÚNIOR, V. Transformadores de Potência em Alta Tensão: Análise de Estado, Diagnósticos e Revitalização. In: WORKSPOT, 2., Salvador, ago. 2001. **Anais...** Salvador: 2001.

MENEMENLIS, C.; HARBEC, G.; HOULD, A.; SHPERLING, B.R.; POKORNY W.; ZELINGHER, S. Air insulation design of UHV stations based on switching surges. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, n. 2, Feb. 1981.

MICHAEL LAI, W.; RUBIN, D.; KREMPL, E. Introduction to continuum mechanics. 4th. ed. New York: Elsevier, 2009. 536p.

MIGLIAVACCA, G. **Advanced tecnologies for future transmission grids**. 2013

MIRON, A.; GAL, S.A.; NEDELCU, I.; COMANESCU, D. The Using differential protection based wide area protection to prevent large contingencies in the power grids. B5-101, SC B5, In: CIGRÉ Bienal Session, 44th Paris, August 2012. **Proceedings...** 2012.

MOLINA, M.G. Distributed energy storage systems for applications in future *Smart Grids*. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION: Latin America Conference and Exposition T&D-LA, 6. IEEE/PES, 2012. **Presentation...** 2012.

MOLINA, M.G.; MERCADO P.E.; WATANABE, E.H. Improved superconducting magnetic energy storage SMES controller for high-power utility applications. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 26, n. 2, p. 444-456, Jun. 2011.

MOUSA, S.; GRIFFITHS, H.; HARID, N.; HADDAD, A. Experimental investigation of high frequency and transient performance of earth rod systems.In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION ICLP, Vienna, Austria, 2012. **Proceedings...** 2012.

MOUTON, G.N.J. **An Evaluation of different material line insulators under high voltage ac and bipolar dc excitation in a marine polluted environment.** Tese (Mestrado) - Universidade de Stellenbosch, África do Sul, 02/2012.

MUKOYAMA, S. et al. Model cable tests for a 275 kV 3 kA HTS power cable. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity** v. 21, n. 3, 2011. p. 976-979

MULLER, G.M. **Impacto de novas tecnologias e *Smart Grids* na demanda de longo prazo do Sistema Elétrico Brasileiro.** Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Elétrica, março de 2016.

NAGAO, F.S.; SEIFERT, J.; STOKER, J.; VOSLOO, W.; WINTER, H.-J. Resistance to weathering and UV radiation of polymeric materials for outdoor insulation. **Brochura Técnica do Cigré,** n. 488, fev. 2012.

NEKEB, A.S.; HARID, N.; HADDAD, A. Effect of UV irradiation on the leakage current of polymeric insulators. In: INTERNATIONAL UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, 46th. Soest - Germany: sept. 2011. Proceedings… 2011.

NISHIMACHI, S.; HAYAKAWA, N.; KOJIMA, H.; HANAI, M.; OKUBO H. Pressure and temperature dependence of breakdown characteristics of sub-cooled liquid nitrogen. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, **Proceedings...** p. 440-443, 2012

NOE, M.; STEURER, M. High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status, **Supercond. Sci. Technol.**, v. 20, n. 3, p. 15-29, Jan. 2007.

NOE, M. et al. Common characteristics and emerging test techniques for high temperature superconducting power equipment, **Electra,** n. 285, CIGRE, Apr. 2016, p. 43-45.

OHTSUBO, Y. et al. Development of REBCO superconducting transformers with a current limiting function—fabrication and tests of 6.9 kV-400 kVA transformers. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 25, n. 3, p. 1-5, Jun. 2015.

OKUBO, H.; BEROUAL, A. Recent trend and future perspectives in electrical insulation techniques in relation to sulfur hexafluoride SF6 substitutes for high voltage electric power equipment. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 27, n. 2, p 34-42 Mar/Apr. 2011.

OLIVEIRA FILHO, O.; MELLO, D.R. DE; CARDOSO, J.A.; AZEVEDO, R.M. DE; CARVALHO, S.G.; CRUZ, W.A.S. Flashover tests under wet conditions on full and sectioned UHV insulators. In: BIENAL CIGRÉ 2010, Paris, artigo D1-201 **Proceedings...** 2010.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÈTRICO - ONS. **Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção;** Submódulo 2.6 dos procedimentos de rede, revisão 2016.12, Resolução Normativa nº 756/16 da ANEEL, 16 dez. 2016.

_____. **Requisitos mínimos de supervisão e controle para a operação**. Submódulo 2.7 dos procedimentos de rede, revisão 2016.12, Resolução Normativa nº 756/16 da ANEEL, 16 dez 2016.

ORDACGI J.M.; LIMA, R.C.; MORAES R.M.; SOLLERO, R.B. System integrity protection schemes - SIPS. In: PAC World 2010 Conference, Dublin IE, June 2010.

Invited Paper # 13, Dublin IE, June 2010.

ORDAGCI, J.M.; SANTOS, H.C.T.; MORAND, S.R.; CESPEDES, R. et al. ONS - Brasil new control center achitecture conceptual design. TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2008. **Proceedings...** 2008.

ORDACGI, J.M.; SIQUEIRA, I.P.; MORAES, R.M.; SOLLERO, R.B. Structure of data and information for protection, automation, control and operation applications. In: ACTUAL TRENDS IN DEVELOPMENT OF POWER SYSTEM PROTECTION AND AUTOMATION CONFERENCE, Russian CIGRÉ, St. Petersburg RU, May/June 2011. **Paper PS5 - S2-01.** St. Petersburg RU, May/June 2011.

ORDACGI, J.M.; SOLLERO, R.B.; BAASS, W.; BRAND, K-P.; MESMAEKER, I. DE; WERNER, T. Substation automation in the next decade: predictable steps and sound visions. B5_110_2010, SC B5, In: CIGRÉ Bienal Session, 43rd Paris, August 2010. **Proceedings...** Paris: 2010.

PANTELI, M.; KIRSCHEN, D.S.; CROSSLEY, P.A.; SOBAJIC, D.J. Enhancing situation awareness in power system control centers. In: IEEE INTERNATIONAL MULTI-DISCIPLINARY CONFERENCE ON COGNITIVE METHODS IN SITUATION AWARENESS AND DECISION SUPORT, San Diego, USA, 2013. **Proceedings...** 2013.

PANTELI, M.; KIRSCHEN, D.S. Situation awareness in power systems: theory, challenges and applications. **Electric Power Systems Research**, v. 122, p. 140-151, 2015.

PAPAILIOU, K.O.; THADDEY, S.; SCHMUCK, F.; ARMSCHAT, C.; STANKEWITZ, J.C. Development of an 800kV HVDC station post design based on the long-term experience with composite line post insulators. In: BIENAL CIGRÉ 2010, Paris, artigo B3.101. **Proceedings...** 2010.

PHADKE, A.G.; THORP, J.S. **Computer relaying for power systems.** Research Studies Press, John Wiley and Sons Inc., 1988.

_____. **Synchronized phasor measurements and their applications**, Springer, 2008.

PIGINI, A.; CORTINA, R.; MARZINOTTO, M.; LAGROTTERIA, G. Pollution tests on composite insulators: the Italian experience. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 19th. Pilsen, Czech Republic, aug. 2015. **Proceedings...** 2015.

PIGINI, A.; MELLO, D. R. DE; JUN, Z.; HOULGATE, R.; KONDO, K.; KRUSKA, B.; MATSUOKA, R.; PERROT, F.; PIROVANO, G.; SKLENICKA, V.; SEIFERT, J.; WESLEY, R.; WU, D.; YAMARKIN, M. Impact of rain on Insulator performance. **Brochura Cigré** n. 634, out. 2015.

POLASEK, A.; DIAS, R.; SERRA, E.T.; FILHO, O.O.; NIEDU, D. Short-circuit testing of monofilar Bi-2212 coils connected in series and in parallel. **Journal of Physics:Conference Series**, 2011.

POLASEK, A.; SENA, C.V.; DIAS, R.; SERRA, E.T.; RIZZO, F.C. Testing of a resistive fault current limiter

component based on Bi-2212 bulk superconductor. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 19, n. 3; p. 1823-1826, 2009.

POPPER, K.R. **A lógica da pesquisa científica**. Trad. L. Hegenberg; O. S. da Mota. São Paulo: Cultrix, 2013. 454 p.

PRIVAULT, N. **Understanding markov chain.** Singapore: Springer, 2013. 354 p.

QUI, Y.; SUN A.; KUFFEL, E. Improved dielectric strength of SF6 gas with a trichlorotrifluoroethane vapor additive. **IEEE Transactions on Electrical Insulation** v. EI-22, n.6, Dec. 1987.

REN, L. et al. Development of a movable HTS SMES system. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 25, n. 4, p. 1-9, Aug. 2015.

RIECHERT, U.; KRÜSI, U.; HOLAUS W.; SOLOGUREN, D. **Design and test of gas-insulated circuit-breaker and disconnector for 1100 kV**.

_____. Gas-insulated switchgear for 1100 kV - Challenges in development and testing. In: STUTTGARTER HOCHSPANNUNGSSYMPOSIUM, 2008. **Proceedings...** 2008.

ROSÁRIO, M.C.V. do. **Coordenação de isolamento em linhas aéreas - Metodologias e Aplicação à Compactação de Linhas.** Tese (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa, 2011.

SACHDEV, M. Teaching, training and learningpower system protection. In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 5**, 2010.

SAMIMI, M.H.; ABEDINI, M.; MOSTAJABI, A.H.; FAROKHZAD, D.; AYOUBZADEH, H.; AKMAL, A.A.S.; MOHSENI, H. Reactor failure due to resonance in zahedan-iranshahr parallel EHV lines - analysis and practical solutions. **Acta Polytechnica Hungarica,** v. 11, n. 1, 2014

SASS, F. **Modelagem do comportamento de mancais magnéticos utilizando fitas e blocos maciços supercondutores**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015a.

SASS, F.; DIAS, D.H.N.; SOTELO G.G.; ANDRADE, R. de. Lateral displacement influence on the levitation force of YBCO coated conductor linear bearings. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 24, n. 3, p. 1-5, Jun. 2014.

SASS, F.; DIAS, D.H.N.; SOTELO G.G.; ANDRADE, R. de. Superconducting levitation using coated conductors. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** v. 23, n. 3, p. 3600905-3600905, Jun. 2013.

SASS, F. et al. Coated conductors for the magnetic bearing application. **Physics Procedia** n. 36, p. 1008-1013, 2012.

SASS, F. et. al. H-formulation for simulating levitation forces acting on HTS bulks and stacks of 2G coated conductors. **Superconductor Science and Technology**, v. 28, p. 125012, 2015c.

SASS, F. et. al, Persistent currents in a magnetic bearing with coated conductors. **Journal of Applied Physics** v. 118, n. 20, p. 203901, 2015b.

SAUERS, I.; JAMES, D.R.; ELLIS, A.R.; PACE, M.O. High voltage studies of dielectric materials for HTS power equipment. **IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 9, n.6, p.922-931, 2002.

SAUERS, I.; TUNCER, E. **Strategic dielectrics R&D for HTS and other OE applications.** DOE Peer Review, 2009.

SCHMITT, L. Micro grid. **Protection, Automation and Control World Magazine**, Sept. 2015. p. 18-25.

SEBASTIAN, R.; PEÑA ALZOLA, R. Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n.16, 2012. p. 6803-6813.

SEEWALD, M.G.; TAFT, J.D. Distributed control for DER and distribution automation. **Protection, Automation and Control World Magazine**, Sept. 2013.

SHEIKH, M.R.I.; MUYEEN, S.M.; TAKAHASHI, R.; MURATA, T.; TAMURA, J., Minimization of fluctuations of output power and terminal voltage of wind generator by using STATCOM/SMES. **PowerTech, IEEE** Bucharest, Jun. 2009.

SHIOHARA, Y. et. al. Future prospects of high Tc superconductors-coated conductors and their applications. **Physica C**, v. 484, p. 1-5, 2013.

SIANO, P. Demand response and *Smart Grids* - a survey. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, Feb. 2014.

SIEMENS. **Efficient condition recording and diagnosis for power transformers.** Catálogo SITRAM + Modular Monitoring System.

SMART GRIDS **SRA 2035;** Strategic research agenda. European Technology Plataform *Smart Grids*. mar.2012. Disponível em: <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf>

SOTELO, G.G. **Modelagem de supercondutores aplicada ao projeto de mancais magnéticos.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007a.

SOTELO, G.G.; FERREIRA A.C.; ANDRADE, R. de. Halbach array superconducting magnetic bearing for a flywheel energy storage system. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 15, n. 2, p. 2253-2256, Jun. 2005.

SOTELO, G.G.; FERREIRA A.C.; ANDRADE, R. de. Magnetic bearing sets for a flywheel system. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 17, n. 2, p. 2150-2153, Jun. 2007b.

SOTELO, G.G.; FERREIRA A.C.; ANDRADE, R. de. Test and simulation of superconducting magnetic bearings. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 19, n. 3, p. 2083-2086, Jun. 2009.

SOTELO, G.G. et al. Tests with a hybrid bearing for a flywheel energy storage system. **Superconductor Science and Technology**, n. 29, p. 095016, 2016.

SPENCER, A.J. **Continuum Mechanics**. S.l.: Dover Publications, 2004. 208 p. (Dover books on physics).

STAINES, M. The development of a Roebel cable based 1 MVA HTS transformer. **Superconductor Science and Technology** v. 25, n.1, 2011. p. 014002.

STEMMLE, M.; MERSCHEL, F.; NOE, M.; HOBL, A. AMPACITY Project - Worldwide first superconducting cable and fault current limiter installation in a German city center. In: CIRED 22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, 10-13 June 2013, **Paper 0742**.2013.

STENESTAM, B.O.; HARTINGS, R. Challenges and tests performed in the development of UHV AC and 800 kV UHV DC bushings. In: IEC/CIGRE UHV Symposium Beijing jul. 2007, artigo 2-5-3. **Proceedings...** Beijing: 2007.

STEPHAN, R.M. et al. **Mancais magnéticos - mecatrônica sem atrito.** Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda., 2013.

STEPHAN, R.M.; ANDRADE Jr., R. de; SOTELO, G.G. Third generation of Flywheels: a promising substitute to batteries. **Eletronica de Potencia** n.3, 2008. p. 171-176.

STEPHAN, R.M.; ANDRADE Jr., R. de; SOTELO, G.G. FERREIRA, A.C. superconducting levitation applied to urban transportation. **Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering**. p. 1-18. 2017.

STRASIK, M. et al. An overview of Boeing flywheel energy storage systems with high-temperaturesuperconducting bearings. **Superconductor Science and Technology**, n. 23, p. 034021, 2010.

TERZIJA, V.; VALVERDE, G.; CAI, D.; REGULSKI, P.; MADANI, V.; FITCH, J.; SKOK, S.; BEGOVIC, M.M. Wide-area monitoring, protection, and control of future electric power networks. **Proceedings of the IEEE**, v. 99, *n.* 1, Jan. 2011.

THOMAS, M.S.; MCDONALD, J.D. **Power system SCADA and *Smart Grids*.** CRC Press, 2015.

THORP, J.S.. PHADKE, A.G. Synchrophasors: their applications and benefits. In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 14**, 2010.

THUE, W.A. **Electrical power cable engineering**. New York: Marcel Dekker, 2005. 394 p. Disponível em: < http://www.cesc.co.in/cesc/e-prognya/cms/wp-content/uploads/2012/05/electrical-cable.pdf >.

TIXADOR, P. et al. Design and first tests of a 800 kJ HTS SMES. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 17, n. 2, p. 1967-1972, Jun. 2007.

TRENCH. **Gas-insulated Instrument Transformers for outdoor installation.** Bamberg, Germany: 2000. Disponível em: < http://www.trenchgroup.com/content/ download/1340/11176/file/SF6%20insulated%20 Instrument%20Transformers.pdf>

_____. **Optical current transformers for air insulated substations.** The Proven Power. ago. 2016. Disponível em: <http://www.trenchgroup.com/content/download/ 2024/17555/file/Optical%20 Current%20Transformers_IEC_2016.pdf>

TUNCER, E.; POLIZOS, G.; SAUERS, I.; JAMES, D.R.; ELLIS, A.R.; MESSMAN, J.M.; AYTUG, T. Polyamide 66 as a cryogenic dielectric. **Cryogenics,** 2009.

UDREN, E. Principles for practical wide-area backup protectionwith synchrophasor communications, b5-112, sc b5, In: CIGRÉ BIENAL SESSION, 45th Paris, aug. 2014.

VANDIVER III, B.; APOSTOLOV, A. Object-oriented testing of multifunctional protection relays - or how protection testing has changed. In: PAC World 2010 CONFERENCE, Dublin IE, June 2010. **Invited Paper # 15**, 2010.

VENKATESH, R.; KANNAN, S.R. Diagnostic testing and condition monitoring of transformer bushings. In: IEEE ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2002. **Proceedings...** 2002.

VERBOOMEN, J.; VAN HERTEM, D.; SCHAVEMAKER, P.H.; KLING, W.L.; BELMANS, R. **Phase shifting transformers: principles and applications**. Research Gate, publicação 1502

WALTER, H. et al. First heavy load bearing for industrial application with shaft loads up to 10 kN, **Journal of Physics:** Conference Series. v. 43. n. 1. IOP Publishing, 2006.

WANG, Y. et al. Development of a 630 kVA three-phase HTS transformer with amorphous alloy cores. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 17, n. 2, p. 2051-2054, Jun. 2007.

WANG, Y. et al. Development and test in grid of 630 kVA three-phase high temperature superconducting transformer. **Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China** n. 4, p. 104-113, 2009.

WANG, X.; LIANG, X.; ZHOU, Y. Aging effect of UV radiation on SIR insulators' hydrophobicity property. In: IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2004. **Proceedings...** 2004.

WARRINGTON, A.R. van C. **Protective relays** - their theory and practice.v. I e II, Chapman and Hall, John Wiley and Sons Inc., 1977.

WEI-JIE, Z.; XIAO-XIN, Z.: A Novel design of flexible controlled shunt reactor. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED POWER SYSTEM AUTOMATION AND PROTECTION, TBEA Shenyang, China, 2011, v. 3, p. 1833-1837. **Proceedings...** 2011.

WERFEL, F.N. et al. A Compact HTS 5 kWh/250 kW flywheel energy storage system. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** v. 17, n. 2, p. 2138-2141, Jun. 2007.

WERFEL, F.N. et al. Superconductor bearings, Flywheels and transportation. **Superconductor Science and Technology** n. 25, p. 014007, 2011.

WERNER,T. et al. Substation automation in the next decade:predictable steps and sound visions. B5_110_2010, SC B5, In: CIGRÉ Bienal Session, 43rd Paris, August 2010. **Proceedings...** 2010.

WESTINGHOUSE. **Applied protective relaying.** Book, 1976.

WHITE, A. **Design of high voltage power transformers.** Curso organizado pelo Institution A of Engineering and Technology Power Systems and Equipment Network IET, 2007.

WILKINSON, D. Optical instrument transformers. *In:* Revenue Metering Sub-Committee Meeting, mar. 2006. **Presentation...** Ontario: IESO, 2006. Disponível em: < http:// www.iemo.com/Documents/imowebpub/200603/rm_pres-20060308-Optical-Instrument-Transformers.pdf>

WOLSKY, A.M. **HTS from precommercial to comercial: a *roadmap* to future use of HTS by the Power Sector.** International Energy Agency, 2013.

WU, D.; ÅSTRÖM, U.; ALMGREN, B.; SÖDERHOLM, S. Investigation into alternative solutions for HVDC station post insulators. In: International Conference on Power System Technology, POWERCON '98. 1998. **Proceedings...** 1998.

YAGI, M. et al. Experimental results of 275-kV 3-kA REBCO HTS power cable. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity** v. 25, n.3, 2015. p. 1-5.

ZHANG, J. et al. Construction, testing and operation of a 1 MJ HTS Magnet at a 10.5 kV superconducting power substation. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity,** v. 22, n. 3, p. 5700504-5700504, Jun. 2012.

ZHAO, H.; LI X.; LIN, H. Insulation characteristics of c-C4 F8-N 2 and CF3 I-N2 mixtures as possible substitutes for SF6. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 1, feb. 2017.

ZIEGLER, G. **Numerical distance protection - principles and applications.** SIEMENS.

ZUEGER, H. 630 kVA High temperature superconducting transformer, **Cryogenics** n. 38, p. 1169-1172, 1998.

Anexo - Planilha de indicadores

Ver documento em formato digital disponível em https://www.cgee.org.br/energia.

Listas

Lista de Figuras

Figura 1 - Esquema de Abrangência de PAC da Transmissão 268

Figura 2 - Temáticas de Proteção, Automação e Controle (PAC) da Transmissão 269

Figura 3 - Esquematização do Acesso de Segurança e Qualidade 273

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Transmissão Existente com a Sinalização das Possibilidades de Implantação de Inovações Tecnológicas 62
Gráfico 2 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Modelos, Conceitos e Critérios para a Realização de Estudos de Planejamento da Expansão do Sistema 63
Gráfico 3 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transmissão em UAT 65
Gráfico 4 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Transmissão Multifásico 66
Gráfico 5 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Transmissão de Meia-onda 68
Gráfico 6 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistema de Transmissão em Circuitos Múltiplos 69
Gráfico 7 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Corrente Contínua LCC 81
Gráfico 8 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transmissão em Corrente Contínua (CC) - Elo de Tensão Contínua VSC 82
Gráfico 9 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores CA/CC - Fonte de Corrente (CSC) LCC 84
Gráfico 10 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Conversores CA/CC Fonte de Tensão (VSC) 85
Gráfico 11 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias de Equipamentos para Transmissão em CC 87
Gráfico 12 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Eletrodos para Sistema de Transmissão em CC 88
Gráfico 13 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Métodos e Equipamentos de Transmissão por Cabos Isolados 99
Gráfico 14 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Variáveis Ambientais que Impactam no Dimensionamento das Linhas Subterrâneas 100
Gráfico 15 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Cabos Isolados e Acessórios 101
Gráfico 16 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Metodologias para dimensionamento de linhas subterrâneas 102
Gráfico 17 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Materiais 104
Gráfico 18 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensadores SVC, Statcom 115
Gráfico 19 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensador em Paralelo por Reator Saturável e Reator Modular 116
Gráfico 20 - Compensadores com armazenamento de energia: Statcom 117
Gráfico 21 - Compensadores síncronos de velocidade variável 119
Gráfico 22 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensação de Potência Reativa (e Ativa) usando aos Conversores das Fontes Solar e Eólica 120
Gráfico 23 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensadores Série: TCSC 122
Gráfico 24 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Compensadores Paralelo-série: UPFC e UPLC 123

Gráfico 25 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Controle de Equipamento Facts e interação com demais equipamentos 125
Gráfico 26 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Modelos para a Aplicação de Facts 127
Gráfico 27 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Estudos para a Aplicação de Facts 128
Gráfico 28 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Fitas de Alta Temperatura 2G - Estrutura de multicamadas na forma de filmes 150
Gráfico 29 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Processos de Fabricação de Fios MgB_2 151
Gráfico 30 - Evolução da maturidade tecnológica da Rota Sistemas de Refrigeração Criogênica para Equipamentos Supercondutores 154
Gráfico 31 - Evolução da maturidade tecnológica da Rota Isolantes Elétricos para Baixas Temperaturas 155
Gráfico 32 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Limitadores de Corrente de Curto - circuito Supercondutores 158
Gráfico 33 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Cabos Supercondutores 160
Gráfico 34 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Aerogerador Supercondutor 161
Gráfico 35 - Evolução da maturidade tecnológica da rota SMES 164
Gráfico 36 - Evolução da maturidade tecnológica da rota *Flywheels* 166
Gráfico 37 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transformadores Supercondutores 167
Gráfico 38 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novos Tipos de Condutores 178
Gráfico 39 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novos Tipos de Isoladores 179
Gráfico 40 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desempenho de Isoladores Poliméricos 181
Gráfico 41 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novos Tipos de Estruturas 182
Gráfico 42 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Otimização de Projetos de Fundações 184
Gráfico 43 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Otimização de Projetos de Linhas Incluindo Avaliação de LTs Existentes 185
Gráfico 44 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Carregamentos Mecânicos em Linhas de Transmissão 186
Gráfico 45 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias para Montagem e Manutenção de LTs 188
Gráfico 46 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Determinação da Vida Remanescente de Linhas de Transmissão 189
Gráfico 47 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Mitigação do Impacto Ambiental 191
Gráfico 48 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Aterramento para Estruturas de Transmissão 192
Gráfico 49 - Evolução da maturidade tecnológica da rota SAI 205
Gráfico 50 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Subestações Isoladas a Gás (SIG) 206
Gráfico 51 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Subestações Híbridas (SH) 207
Gráfico 52 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Metodologias e Tecnologias de Monitoramento 209

Gráfico 53 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Transformador Defasador 211
Gráfico 54 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Transformadores de Potência 212
Gráfico 55 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Buchas 214
Gráfico 56 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Equipamentos de Medição - TC e TP 216
Gráfico 57 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Disjuntores 218
Gráfico 58 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Seccionadores 219
Gráfico 59 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias Envolvendo Para-raios 221
Gráfico 60 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Materiais Avançados Aplicados a Equipamentos de Alta Tensão 223
Gráfico 61 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desempenho de Cabos Isolados em alta e Extra-alta Tensão 224
Gráfico 62 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Aspectos Naturais ou Artificiais 227
Gráfico 63 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Tecnologias de Aterramento 229
Gráfico 64 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Testes e Certificações de Equipamentos de UAT 231
Gráfico 65 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Isoladores tipo suporte em alta, extra e ultra-alta tensão 233
Gráfico 66 - Evolução da maturidade tecnológica da rota PMU na Operação 248
Gráfico 67 - Evolução da maturidade da operação do sistema em tempo real 249
Gráfico 68 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Monitoramento e Avaliação dos Efeitos Harmônicos no Sistema Elétrico 250
Gráfico 69 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Monitoramento e Análise de Dados Meteorológicos para Apoio à Operação do Sistema 252
Gráfico 70 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sistemas Especialistas para Apoio à Decisão Operativa em Tempo Real 253
Gráfico 71 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Técnicas e Processos de Manutenção da Transmissão 255
Gráfico 72 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Segurança Elétrica na Operação 256
Gráfico 73 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Técnicas e Processos de Manutenção da Transmissão 259
Gráfico 74 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Avaliação de Ativos 260
Gráfico 75 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Monitoramento dos Sistemas de Transmissão 261
Gráfico 76 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Proteção 280
Gráfico 77 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Localização de Faltas Transitórias 281

Gráfico 78 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Automação e Controle 282
Gráfico 79 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções RDP Stand Alone 284
Gráfico 80 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções PMU Stand Alone 286
Gráfico 81 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Barramento de Estação - IEC 61850 289
Gráfico 82 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Funções de Barramento de Processo - IEC 61850 290
Gráfico 83 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Softwares para Implementação de Proteção Unitária Remota para Curto-circuito em cada Componente do Sistema Elétrico Empregando Sincrofasores 293
Gráfico 84 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Softwares para a Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência que se Integrem com os Instrumentos de Testes 294
Gráfico 85 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Software para Aplicação em PAC 296
Gráfico 86 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Equipamentos de Testes para PAC 298
Gráfico 87 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desenvolvimento de Ferramentas para Sistemas de Testes em Tempo Real 299
Gráfico 88 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Wasa e Wampac 316
Gráfico 89 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Novas Estratégias e Metodologias de Suporte à Tomada de Decisões 318
Gráfico 90 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Sensoriamento e Monitoramento Avançado em Funções de Geração e Transmissão 320
Gráfico 91 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Segurança Patrimonial, Segurança Cibernética e Infraestrutura Computacional para o Suporte à Transferência e ao Gerenciamento de Grandes Volumes de Dados 322
Gráfico 92 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desempenho da Rede Elétrica no Contexto de Elevada Penetração de Fontes Variáveis e Reduzida Inércia 324
Gráfico 93 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Desempenho da Rede Elétrica no Contexto de Elevada Penetração de Geração Distribuída e Esquemas de Gerenciamento da Demanda na Distribuição 326
Gráfico 94 - Evolução da maturidade tecnológica da rota Gerenciamento da Informação e Ações dos Centros de Operação de Distribuição com os Centros de Controle do Sistema Interligado 327

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas, Modelos, Conceitos e Critérios para a Realização de Estudos de Planejamento da Expansão e Sistema de Transmissão Existente com a Sinalização das Possibilidades de Implantação de Inovações Tecnológicas 64

Tabela 2 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas transmissão em UAT e Sistema de Transmissão Multifásico 67

Tabela 3 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistema de Transmissão em Meia-onda e Sistema de Transmissão em Circuitos Múltiplos 70

Tabela 4 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Sistema de Transmissão em CA 71

Tabela 5 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Transmissão em Corrente Contínua 83

Tabela 6 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Conversores CA/CC Fonte de Tensão (VSC) 86

Tabela 7 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Eletrodos para Sistema de Transmissão em CC e Novas Tecnologias de Equipamentos para Transmissão em CC 89

Tabela 8 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Sistema de Transmissão em Corrente Contínua (CC) 90

Tabela 9 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Métodos e Equipamentos de Transmissão por Cabos Isolados/ Cabos Isolados e Acessórios/ Variáveis Ambientais que Impactam no Dimensionamento das Linhas Subterrâneas e Metodologias para a Concepção e o Dimensionamento de Linhas Subterrâneas 103

Tabela 10 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Materiais 105

Tabela 11 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Sistema de Transmissão por Cabos Isolados 105

Tabela 12 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Compensadores com Armazenamento de Energia: Statcom (Bateriais ou Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES ou Supercapacitores)/Reator Saturável e Reator Modular Chaveado e SVC, Statcom 118

Tabela 13 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Compensação de Potência Reativa (e Ativa) Usando Conversores das Fontes Solar e Eólicas e Compensadores Síncronos de Velocidade Variável com Armazenamento de Energia (associados ou não a usinas reversíveis) 121

Tabela 14 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Controles de Equipamentos Facts e Interação com Demais Equipamentos/ Novas Tecnologias de Compensadores Série (SSSC) e Paralelo-Série (UPFC e UPLC) e TCSC 124

Tabela 15 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Controles de Equipamentos FACTS e Interação com os Demais Equipamentos 126
Tabela 16 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Estudos para a Aplicação de Facts e Modelos para a Aplicação de Facts 129
Tabela 17 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Facts 130
Tabela 18 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Fitas de Alta Temperatura 2G e Evolução da Maturidade Tecnológica da Rota Processos de Fabricação de Fios MgB_2 152
Tabela 19 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sistemas de Refrigeração Criogênica para Equipamentos Supercondutores e Isolantes Elétricos para Baixas Temperaturas 156
Tabela 20 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Limitadores de Corrente Supercondutores, Cabos Supercondutores e Aerogeradores Supercondutores 162
Tabela 21 - Fatores portadores de futuro de evolução das rotas SMES, *Flywheels* e Transformadores Supercondutores 168
Tabela 22 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Supercondutores 169
Tabela 23 - Fatores portadores de futuro para as rotas Tecnológicas Novos Tipos de Condutores e Novos Tipos de Isoladores 180
Tabela 24 - Fatores portares de futuro da evolução das rotas Desempenho de Isoladores Poliméricos e Novos Tipos de Estruturas 183
Tabela 25 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Otimização de Projeto de Fundações, Otimização de Projetos de Linhas Aéreas Incluindo Avaliação de Linhas Existentes e Carregamentos Mecânicos em Linhas de Transmissão 187
Tabela 26 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Tecnologias para Montagem e Manutenção de Linhas de Transmissão e Determinação da Vida Remanescente de Linhas de Transmissão 190
Tabela 27 - Fatores portadores de futuro das rotas Mitigação do Impacto Ambiental e Aterramento para Estruturas de Transmissão 193
Tabela 28 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Estruturas, Condutores e Isoladores 194
Tabela 29 - Fatores portadores de futuro da evolução das rotas SIA, SIG e SH 208
Tabela 30 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Metodologias e Tecnologias de Monitoramento para Equipamentos 210
Tabela 31 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Transformador Defasador, Novas Tecnologias Envolvendo Transformadores de Potência e Novas Tecnologias Envolvendo Buchas 215
Tabela 32 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Tecnologias Envolvendo Equipamentos de Medição 217
Tabela 33 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Tecnologias Envolvendo Disjuntores e Novas Tecnologias Envolvendo Seccionadores 220

Tabela 34 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Tecnologias Envolvendo Para-raios 222

Tabela 35 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Materiais Avançados Aplicados a Equipamentos de Alta Tensão 223

Tabela 36 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desempenho de Cabos Isolados em Alta e Extra-alta Tensão 225

Tabela 37 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Tecnologias de Aterramento 228

Tabela 38 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Tecnologias de Aterramento 230

Tabela 39 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Testes e Certificações de Equipamentos de UAT 232

Tabela 40 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desempenho dos Isoladores Tipo Suporte em Alta, Extra e Ultra-alta Tensão 234

Tabela 41 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Equipamentos de Alta Tensão e Subestações 235

Tabela 42 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas PMU na Operação, Operação em Tempo Real e Monitoramento e Avaliação dos Efeitos de Harmônicos no Sistema Elétrico 251

Tabela 43 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Monitoramento e Análise de Dados Metrológicos para Apoio à Operação do Sistema e Sistemas Especialistas de Apoio à Decisão Operativa em Tempo Real 254

Tabela 44 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Técnicas para a Recomposição do Sistema e Segurança Elétrica na Operação 257

Tabela 45 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Técnicas e Processos de Manutenção da Transmissão, Avaliação de Ativos e Monitoramento dos Sistemas de Transmissão 262

Tabela 46 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Operação e Manutenção dos Sistemas de Transmissão 263

Tabela 47 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desenvolvimento de Funções de Proteção, Desenvolvimento de Funções de Localização e Faltas Transitórias e Desenvolvimento de Funções de Automação e Controle 283

Tabela 48 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desenvolvimento de Funções de Registrador Digital de Perturbações (RDP) Stand Alone e Desenvolvimento de Funções de Unidade de Medição Sincrofasorial (PMU) Stand Alone 287

Tabela 49 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desenvolvimento de Funções de Barramento de Estação - IEC 61850 e Desenvolvimento de Funções de Barramento de Processo - IEC 61850 291

Tabela 50 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desenvolvimento de *Softwares* para Implementação de Proteção Unitária Remota para Curto-Circuito em cada Componente do Sistema Elétrico Empregando Sincrofasores, Desenvolvimento de *Softwares* para Análise de Transitórios em Sistemas Elétricos de Potência que se integrem com os Instrumentos de Testes e Desenvolvimento de *Software* para Aplicação em PAC 297

Tabela 51 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desenvolvimento de Equipamentos de Testes para PAC e Desenvolvimento de Ferramentas para Sistemas de Testes em Tempo Real 300

Tabela 52 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Proteção, Automação e Controle do Sistema de Transmissão 301

Tabela 53 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Wasa e Wampac 317

Tabela 54 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Novas Estratégias e Metodologias de Suporte à Tomada de decisões 319

Tabela 55 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Sensoriamento e Monitoramento Avançado em Funções de Geração e Transmissão 321

Tabela 56 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Segurança Patrimonial, Segurança Cibernética e Infraestrutura Computacional para o Suporte à Transferência e ao Gerenciamento de Grandes Volumes de Dados 323

Tabela 57 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desempenho da Rede Elétrica no Contexto de Elevada Penetração de Fontes Variáveis e Reduzida Inércia 325

Tabela 58 - Fatores portadores de futuro para as rotas tecnológicas Desempenho da Rede Elétrica no Contexto de Elevada Penetração de Geração Distribuída e Esquemas de Gerenciamento da Demanda na Distribuição e no Gerenciamento da Informação e Ações dos Centros de Operação da Distribuição com os Centros de Controle do Sistema Interligado 328

Tabela 59 - Ordem de prioridade para as rotas abordadas na macrotemática Redes Elétricas Inteligentes no SIN 329

Lista de siglas e abreviaturas

ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica.

AT | Alta Tensão

CE B5 | Comitê de Estudos B5 - Proteção e Automação do CIGRÉ-Brasil.

CIGRÉ | Conseil International des Grands Réseaux Electriques - International Council on Large Electric Systems (Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos).

CIGRÉ-Brasil | Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.

DEC | duração equivalente de interrupção por unidade consumidora.

EAT | Extra alta tensão

EFEI | Escola Federal de Engenharia de Itajubá, hoje UNIFEI.

EMS | *energy management systems*.

EPE | Empresa de Pesquisa Energética.

FACTS | *flexible alternating current transmission systems*.

FEC | frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora.

GD | geração distribuída.

HVDC | *high voltage direct current*.

IEC | International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional - entidade de normatização).

IEC 61850 | Norma intitulada "Communication Networks and Systems for Power Utility Automation" (Redes e Sistemas de Comunicação para Automação das Empresas de Energia Elétrica).

IED | *intelligent electronic device* (dispositivo eletrônico inteligente).

IEEE | Institute of Electrical and Electronic Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos).

IP | *Internet protocol*.

ISO | International Organization for Standardization (Organização Internacional para Normatização).

MME | Ministério de Minas e Energia.

MU | *merging unit*.

NCTI | *non-conventional instrument transformers*.

PAC | proteção, automação e controle de sistemas elétricos.

PDC | *phasor data concentrator*.

PD&I | pesquisa, desenvolvimento e inovação.

PIB | produto interno bruto.

PMU | *Phasor Measurement Units* (unidades de medição sincrofasorial, em português).

PUR | proteção unitária remota

RDP | registrador digital de perturbações.

SAGE | Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia.

SCADA | *supervisory control and data acquisition*.

SC B5 | CIGRÉ Study Committee B5 - Protection and Automation.

SEB | Setor Elétrico Brasileiro.

SIN | Sistema Interligado Nacional.

SIPS | *System Integrity Protection Schemes* (esquemas de proteção da integridade do sistema elétrico, em português).

SMS | sistema de medição sincrofasorial.

SSC | sistema de supervisão e controle (SCADA + EMS).

SVC | *Static Var Compensator*

TRL | *technology readiness level*

UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina

UFU | Universidade Federal de Uberlândia

UnB | Universidade Federal de Brasília

UNIFEI | Universidade Federal de Itajubá

WAMPACS | *Wide Area Monitoring, Protection, Automation And Control Schemes* (esquemas de monitoramento, proteção, automação e controle em área ampla, em português).

WAPS | *wide area protection scheme*

WG B5.43 | CIGRÉ Working Group B5.43 - Coordination of Protection and Automation for Future Networks.

Empresas:

CESP Companhia Energética de São Paulo

Enercan Campos Novos Energia S.A.

cpfl piratininga Uma empresa do Grupo CPFL Energia

cpfl sul paulista Uma empresa do Grupo CPFL Energia

Light

AES Tietê por onde a vida acontece

BAESA Energética Barra Grande S.A.

COPEL Geração e Transmissão

COPEL Distribuição

APINE Associação Brasileira dos Produtores Independentes de Energia Elétrica

CEMIG 65 Nossa energia, sua força

MINAS GERAIS Diálogo Equilíbrio Trabalho

Comitê estratégico:

ccee Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

epe Empresa de Pesquisa Energética

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO E SERVIÇOS

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

BRASIL Governo Federal

Acesse www.cgee.org.br/energia

cgee
Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Ciência, Tecnologia e Inovação

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES

BRASIL
GOVERNO FEDERAL