



## IMPACTO ECONÔMICO DAS APLICAÇÕES DE SUPERCONDUTIVIDADE DE ALTA TEMPERATURA NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Edisio Alves de Aguiar Junior

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador(es): Richard Magdalena Stephan  
Roberto Schaeffer

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2012

IMPACTO ECONÔMICO DAS APLICAÇÕES DE SUPERCONDUTIVIDADE DE  
ALTA TEMPERATURA NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Edisio Alves de Aguiar Junior

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.

---

Prof. Roberto Schaeffer, Ph.D.

---

Prof. Rubens de Andrade Jr., D. Sc.

---

Prof. Alexandre Salem Szklo, D. Sc.

---

Prof. Ernesto Ruppert Filho, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2012

Aguiar Junior, Edisio Alves de  
Impacto Econômico das Aplicações de  
Supercondutividade de Alta Temperatura no Sistema  
Elétrico Brasileiro/ Edisio Alves de Aguiar Junior – Rio  
de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.

XII, 178 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Richard Magdalena Stephan

Roberto Schaeffer

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de  
Engenharia Elétrica, 2012.

Referências Bibliográficas: p. 172-182.

1. Supercondutividade de Alta Temperatura. 2.  
Análise Qualitativa. 3. Análise Quantitativa. I. Stephan,  
Richard Magdalena *et al.* II. Universidade Federal do Rio  
de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III.  
Título.

# Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, criador de todas as coisas, e que acima de tudo, permitiu que eu chegasse até aqui, e dia após dia, está sempre a mostrar que a vida é uma grande dádiva.

Aos meus pais, por me guiar pelos caminhos da vida. Vocês são a minha inspiração, a minha motivação para realizar cada vez mais e a certeza de que as coisas são possíveis. Obrigado por representarem tanto e não cobrarem absolutamente nada em troca.

A minha irmã, Hélen, pelo companheirismo, pelo apoio nos momentos difíceis, e pelo teu jeito diferente e “sutil” de dizer que está certo ou errado. Eu amo você.

Bruna, você é algo de muito especial na minha vida. Parte disto aqui também lhe cabe, pois você abriu mão de muitas coisas, especialmente da minha companhia. Saiba que te amo de verdade!

Aos meus amigos, do Laboratório de Eletrônica de Potência (ELEPOT), do Inmetro e da Universidade Severino Sombra, que sem dúvida ultimamente tem sido muito mais amigos do que eu. Estou devendo atenção a todos vocês, mas isso será recuperado brevemente.

Gostaria também de fazer um agradecimento aos alunos e professores do Programa de Planejamento Energético (PPE), em especial ao professor Roberto Schaeffer, orientador deste trabalho, que me recebeu no programa e me auxiliou sempre, mesmo quando eu não merecia, e ao Professor Alexandre Salem Szklo, pelo conhecimento transmitido e pelas excelentes discussões técnicas que tivemos, e que espero que possam ser retomadas.

Aos professores do grupo de Eletrônica de Potência, em especial ao meu orientador, Professor Richard Magdalena Stephan, que acreditou em mim quando nem mesmo eu acreditava. Muito obrigado pela confiança, pela enorme paciência e por me mostrar que sempre podemos fazer um trabalho melhor, quando nos dedicamos e acreditamos nele.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## IMPACTO ECONÔMICO DAS APLICAÇÕES DE SUPERCONDUTIVIDADE DE ALTA TEMPERATURA NO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO

Edisio Alves de Aguiar Junior

Dezembro/2012

Orientadores: Richard Magdalena Stephan

Roberto Schaeffer

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho desenvolve uma análise relativa a aplicações de supercondutividade de alta temperatura no sistema elétrico brasileiro, do ponto de vista qualitativo e do ponto de vista quantitativo. Considerando-se as vantagens técnicas do uso de dispositivos baseados em supercondutores, é realizado um levantamento do estado da arte, com as aplicações consideradas mais promissoras. A seguir, dois métodos de análise qualitativos são utilizados: a análise dos sete domínios, particularizada para três e a avaliação SWOT, verificando-se a relevância da tecnologia, do ponto de vista técnico e do ponto de vista de mercado.

Os resultados positivos da avaliação qualitativa motivaram a realização de uma análise quantitativa, dos mercados futuros da supercondutividade de alta temperatura, considerando-se um cenário onde a tecnologia torna-se viável e competitiva perante dispositivos convencionais. A simulação é realizada tomando-se como referência o sistema elétrico brasileiro, no intervalo de tempo entre 2015 e 2040, através de um modelo computacional montado em planilha eletrônica, neste caso, o Microsoft Excel. Os resultados mostram que a viabilidade destes equipamentos depende da redução de custos e evolução técnica dos supercondutores e dos sistemas de criogenia, e que custos de energia elevados aceleram a penetração de mercado.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ECONOMIC IMPACT OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY  
APPLICATIONS TO BRAZILIAN ELECTRIC POWER SYSTEM

Edisio Alves de Aguiar Junior

December/2012

Advisors: Richard Magdalena Stephan

Roberto Schaeffer

Department: Electrical Engineering

This work develops an analysis of the applications of high-temperature superconductivity in the Brazilian electric power system, from qualitative and quantitative points of view. Considering the technical advantages of the use of superconductors based devices, a state of the art survey was conducted, with the most promising applications being considered. Two qualitative analysis methods are used: the seven domains analysis, particularized for three domains and a SWOT evaluation, verifying the technology relevance, in technical and market aspects.

The positive results obtained through the qualitative evaluation motivated conducting a quantitative analysis of futures markets of high-temperature superconductivity, considering a scenario where technology becomes viable and competitive against conventional devices. The simulation is performed using as a reference the Brazilian electrical power system, during the time interval between 2015 and 2040, using a computational model assembled in a spreadsheet, in this case, Microsoft Excel. The results show that the viability depends on cost reduction and technical advances to superconductor materials and cryogenic systems, while high energy costs accelerate the market penetration.

# Sumário

<b>CAPÍTULO 1 – Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivação .....	4
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Metodologia.....	5
1.4. Estrutura do texto .....	6
<b>CAPÍTULO 2 – Avaliação Tecnológica</b> .....	<b>7</b>
2.1. Fios .....	8
2.2. Cabos .....	9
2.3. Transformadores .....	11
2.4. Motores e Geradores.....	12
2.5. Limitadores de Corrente .....	13
2.6. Mancais Magnéticos .....	13
2.7. Exemplos de Aplicações.....	14
2.7.1. Aplicação em geração eólica .....	14
2.7.2. Sistemas de Transmissão Avançados .....	17
2.7.3. Fornos de Indução .....	19
2.7.4. Aplicações em Transporte .....	19
2.7.5. Armazenamento de Energia.....	20
2.8. Conclusões Parciais .....	21
<b>CAPÍTULO 3 – Análise Qualitativa</b> .....	<b>22</b>
3.1. Avaliação Mercado-Indústria-Equipe.....	23
3.1.1. Mercado .....	26
3.1.2. Indústria .....	28
3.1.3. Equipe.....	32
3.2. Avaliação SWOT.....	40
3.2.1. Forças .....	41
3.2.2. Fraquezas .....	42
3.2.3. Oportunidades.....	43
3.2.4. Ameaças.....	44
3.2.5. Quadro Resumo .....	44
3.3. Avaliação Regional.....	45

3.3.1.	EUA .....	46
3.3.2.	Europa.....	47
3.3.3.	Ásia.....	48
3.3.4.	Brasil.....	50
3.4.	Conclusões Parciais .....	52
<b>CAPÍTULO 4 – Análise Quantitativa.....</b>		<b>54</b>
4.1.	Detalhamento do Modelo .....	55
4.2.	Parametrização do Modelo .....	59
4.2.1.	Estimativas do Setor Elétrico Brasileiro.....	61
4.2.2.	Levantamento de Perdas .....	62
4.2.3.	Estimativa de Custo dos Fios.....	73
4.2.4.	Penetração de Mercado.....	75
4.2.5.	Avaliação da Criogenia .....	80
4.2.6.	Comparativo de Motores .....	83
4.2.7.	Comparativo de Geradores .....	92
4.2.8.	Comparativo de Transformadores .....	101
4.2.9.	Comparativo de Cabos .....	107
4.3.	Detalhamento do Modelo e Principais Resultados .....	111
4.4.	Análise de Sensibilidade.....	161
4.5.	Conclusões Parciais .....	164
<b>CAPÍTULO 5 – Conclusões e Trabalhos Futuros .....</b>		<b>166</b>
<b>CAPÍTULO 6 – Referências Bibliograficas .....</b>		<b>172</b>
<b>ANEXO A – Principais Fórmulas e Equações do Modelo .....</b>		<b>183</b>

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1.</b> Comparação da corrente nominal de fios de cobre e supercondutores.....	9
<b>Tabela 2.2.</b> Sistemas de transmissão empregando cabos HTS. ....	10
<b>Tabela 3.1.</b> Mercado Global para Supercondutividade, em Milhões de Euros. ....	27
<b>Tabela 3.2.</b> Empresas envolvidas com supercondutividade. ....	29
<b>Tabela 3.3.</b> Amostras de cabos supercondutores produzidas. ....	30
<b>Tabela 3.4.</b> Grupos de Pesquisa. ....	32
<b>Tabela 3.5.</b> Eventos relativos à supercondutividade.....	36
<b>Tabela 3.6.</b> Conceitos na avaliação da supercondutividade de alta temperatura.....	41
<b>Tabela 3.7.</b> Análise SWOT.....	45
<b>Tabela 3.8.</b> Política de investimentos do ano de 1990.....	46
<b>Tabela 3.9.</b> Projetos Japoneses. ....	49
<b>Tabela 3.10.</b> Instituições brasileiras ligadas à pesquisa em supercondutividade. ....	51
<b>Tabela 4.1.</b> Estimativas realizadas pelo grupo CONECTUS. ....	58
<b>Tabela 4.2.</b> Detalhamento dos dados obtidos do Balanço Energético Nacional, 2010. ....	64
<b>Tabela 4.3.</b> Tarifas de energia elétrica, no período de abril de 2011.....	65
<b>Tabela 4.4.</b> Exemplo de perdas em transformadores trifásicos, para classe de tensão 15 kV. ....	68
<b>Tabela 4.5.</b> Levantamento de perdas do sistema elétrico brasileiro. ....	72
<b>Tabela 4.6.</b> Marcos históricos da fibra ótica e supercondutores.....	75
<b>Tabela 4.7.</b> Parâmetros para o caso norte-americano. ....	77
<b>Tabela 4.8.</b> Parâmetros para o caso brasileiro. ....	78
<b>Tabela 4.9.</b> Potência específica para temperatura ambiente de 300 K. ....	82
<b>Tabela 4.10.</b> Potência específica para temperatura ambiente de 322 K. ....	82
<b>Tabela 4.11.</b> Vendas de motores trifásicos no Brasil.....	85
<b>Tabela 4.12.</b> Comparativo de motor convencional x HTS .....	87
<b>Tabela 4.13.</b> Geradores brasileiros com potência igual ou superior a 100 MVA.....	93
<b>Tabela 4.14.</b> Comparativo de gerador convencional x HTS.....	96
<b>Tabela 4.15.</b> Capacidade de transformação (MVA) em 2007 .....	102
<b>Tabela 4.16.</b> Novas instalações de transformadores.....	102
<b>Tabela 4.17.</b> Comparativo de transformador convencional x HTS. ....	103
<b>Tabela 4.18.</b> Perdas típicas em cabos. ....	109

<b>Tabela 4.19.</b> Percentual dos custos evitados, em relação aos valores máximos possíveis. .....	149
<b>Tabela 4.20.</b> Economia de energia obtida anualmente (GWh).....	153
<b>Tabela 4.21.</b> Consumo médio de energia elétrica por habitante.....	154
<b>Tabela 4.22.</b> Estimativa do consumo anual de energia elétrica por município do estado do Rio de Janeiro - 2010.....	155
<b>Tabela 4.23.</b> Comparação entre municípios e energia economizada.....	158
<b>Tabela 4.24.</b> População das capitais brasileiras no ano de 2010. ....	159
<b>Tabela 4.25.</b> Análise de sensibilidade com relação ao custo do material HTS. ....	162
<b>Tabela 4.26.</b> Análise de sensibilidade com relação ao custo da criogenia. ....	162
<b>Tabela 4.27.</b> Análise de sensibilidade com relação ao consumo futuro de eletricidade. .....	163

# Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Esquema de um aerogerador típico e suas principais partes.....	15
<b>Figura 2.2:</b> Evolução da potência nominal dos Aerogeradores.....	15
<b>Figura 2.3:</b> Demonstrativo dos projetos de sistemas de transmissão. ....	18
<b>Figura 3.1:</b> Método dos sete domínios. ....	24
<b>Figura 3.2:</b> Método dos três domínios.....	25
<b>Figura 3.3:</b> Distribuição das empresas envolvidas com supercondutividade de acordo com região geográfica .....	30
<b>Figura 3.4:</b> Demonstrativo dos grupos de pesquisa pelo mundo .....	35
<b>Figura 3.5:</b> Diagrama da análise SWOT .....	40
<b>Figura 3.6:</b> Política de investimentos .....	47
<b>Figura 4.1:</b> Representação de perdas no sistema elétrico.....	62
<b>Figura 4.2:</b> Alocação de perdas no sistema elétrico .....	66
<b>Figura 4.3:</b> Evolução de vendas de fibra ótica .....	74
<b>Figura 4.4:</b> Evolução da penetração de mercado.....	79
<b>Figura 4.5:</b> Parametrização da energia economizada, em %.....	113
<b>Figura 4.6:</b> Parâmetros da curva “S” .....	113
<b>Figura 4.7:</b> Evolução dos fios.....	114
<b>Figura 4.8:</b> Desempenho dos fios HTS .....	114
<b>Figura 4.9:</b> Evolução do material HTS e demanda de fios por dispositivo.....	116
<b>Figura 4.10:</b> Detalhes da parametrização dos dispositivos .....	117
<b>Figura 4.11:</b> Detalhes da parametrização do custo da criogenia .....	119
<b>Figura 4.12:</b> Comercialização dos sistemas de criogenia.....	120
<b>Figura 4.13:</b> Redução do custo relativo dos sistemas de criogenia.....	120
<b>Figura 4.14:</b> Estimativa da evolução dos custos do material HTS.....	122
<b>Figura 4.15:</b> Redução do preço do fio ao longo dos anos. ....	123
<b>Figura 4.16:</b> Parametrização da evolução do consumo de eletricidade.....	125
<b>Figura 4.17:</b> Estimativa da evolução do consumo de eletricidade no Brasil.....	126
<b>Figura 4.18:</b> Modelo de penetração de mercado para cada dispositivo .....	127
<b>Figura 4.19:</b> Cálculo do valor presente líquido .....	128
<b>Figura 4.20:</b> Cálculo dos anos complementares a vida útil do equipamento .....	129
<b>Figura 4.21:</b> (a) Bloco de dados de motores; (b) Totalização dos dados.....	132

<b>Figura 4.22:</b> Totalização dos ganhos com motores novos e substituídos .....	133
<b>Figura 4.23:</b> Cálculos para transformadores .....	133
<b>Figura 4.24:</b> Bloco com dados sobre geradores .....	134
<b>Figura 4.25:</b> Bloco de dados da aplicação de cabos .....	134
<b>Figura 4.26:</b> Benefício máximo do uso de matéria HTS, em GWh .....	136
<b>Figura 4.27:</b> Economia máxima, por aplicação, em dólares .....	137
<b>Figura 4.28:</b> Mercado para aplicações de material HTS ao longo do tempo .....	138
<b>Figura 4.29:</b> Percentual de vendas, de cada aplicação, de 2015 até 2040. ....	139
<b>Figura 4.30:</b> Dados de vendas de fios HTS .....	140
<b>Figura 4.31:</b> Mercado estimado para sistemas de criogenia.....	141
<b>Figura 4.32:</b> Resultados para motores .....	143
<b>Figura 4.33:</b> Resultados para transformadores .....	144
<b>Figura 4.34:</b> Resultados para geradores .....	144
<b>Figura 4.35:</b> Resultados para cabos.....	145
<b>Figura 4.36:</b> Economia de energia, em GWh .....	146
<b>Figura 4.37:</b> Custos de energia evitados, em milhões de dólares.....	147
<b>Figura 4.38:</b> Gráfico dos custos de energia evitados.....	148
<b>Figura 4.39:</b> Percentual do potencial de economia capturado até 2040 .....	150
<b>Figura 4.40:</b> Mercado esperado para as quatro aplicações.....	151
<b>Figura 4.41:</b> Demanda de fio HTS, por ano .....	152
<b>Figura 4.42:</b> Gráfico da demanda anual de fios HTS .....	153
<b>Figura 4.43:</b> Energia disponível para consumo, comparada com municípios do Rio de Janeiro.....	159

# CAPÍTULO 1

---

## Introdução

---

O fenômeno da supercondutividade manifesta-se em alguns materiais ou ligas quando estes são submetidos a um resfriamento, até atingirem a chamada temperatura crítica, que é uma característica individual de cada um deles. Os primeiros registros do fenômeno da supercondutividade datam de 1911 e estão associados a experimentos realizados pelo cientista holandês H. Kamerlingh Onnes, que, utilizando hélio líquido, resfriou uma amostra de mercúrio à temperatura de  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sob tais condições, medições na amostra apresentaram um material com resistência elétrica desprezível, extremamente próxima de zero [1, 2, 3]. Tal descoberta caracteriza a primeira propriedade fundamental dos materiais no estado supercondutor: a resistência praticamente nula.

A descoberta do estado supercondutor motivou uma série de estudos em diferentes partes do mundo. No ano de 1933, as pesquisas conduzidas por Meissner e Ochsenfeld levaram a descoberta experimental de outra importante propriedade de materiais supercondutores: o diamagnetismo, ou seja, a capacidade do material de expulsar o campo magnético [1, 2, 3].

A dificuldade de obtenção das baixas temperaturas, sendo possível somente com o uso de hélio líquido, acabou por restringir o uso e aplicação de materiais supercondutores em estudos e pesquisas de laboratório. Entretanto, esta barreira tecnológica foi rompida em 1986, quando dois cientistas, Alex Mueller e George Bednorz, realizando pesquisas nos laboratórios da IBM, descobriram uma família de ligas cerâmicas capazes de atingir o estado supercondutor a temperaturas “não tão baixas”. A liga investigada pelos pesquisadores foi composta por LaBaCuO, conhecida como LBCO, apresentando temperatura crítica da ordem de  $-238,15\text{ °C}$  (35 K). Esta descoberta motivou a pesquisa em outras ligas de estrutura similar ao LBCO, como por exemplo o BSCCO (temperatura crítica 107 K ou  $-166,15\text{ °C}$ ) e o YBCO (temperatura crítica 92 K ou  $-181,15\text{ °C}$ ) [1, 2, 3].

Temperaturas como as citadas possibilitam a refrigeração do material não mais com hélio, e sim com nitrogênio líquido, mais barato e mais fácil de ser obtido, tendo como principal consequência a possibilidade do uso de sistemas de refrigeração mais simples, capazes então de ampliar as aplicações comerciais. Estes materiais foram denominados *High Temperature Superconductors* (HTS) ou supercondutores de alta temperatura, em contraste com os primeiros materiais, ditos supercondutores de baixa temperatura ou *Low Temperature Superconductors* (LTS).

A seguir, são apresentados alguns dados históricos relativos à supercondutividade, demarcando uma linha do tempo do assunto [1, 2, 3, 4].

- 1911 – observado o fenômeno, por Onnes, em uma amostra de mercúrio
- 1913 – Heike Kamerlingh-Onnes é agraciado com o Prêmio Nobel, pelas suas pesquisas sobre as propriedades da matéria a baixas temperaturas e pela produção do hélio líquido
- 1933 – Meissner e Ochsenfeld descobrem a característica diamagnética dos materiais em estado supercondutor
- 1950 – Teoria de Ginzburg e Landau, usando mecânica quântica.
- 1957 – Bardeen, Cooper e Schrieffer propõem a teoria BCS.
- 1962 – Pesquisadores da Westinghouse desenvolvem o primeiro fio supercondutor para escala comercial, composto por uma liga de Nióbio e Titânio (NbTi).

- 1972 – Primeiro teste do veículo MAGLEV japonês, utilizando supercondutores para produzir campos magnéticos intensos. O objetivo era ligar Osaka a Tóquio (550 km) em uma hora.
- 1972 – Bardeen, Cooper e Schrieffer recebem o Prêmio Nobel pelo desenvolvimento conjunto da teoria da supercondutividade, também conhecida como Teoria BCS.
- 1982 – Teste de máquinas de ressonância magnética em hospitais.
- 1986 – Descoberta da supercondutividade de alta temperatura, graças a Bednorz e Müller. Supercondutividade na faixa de 30 K.
- 1987 – Supercondutividade a 96 K e 105 K.
- 1988 – Primeiro filme fino de material HTS
- 1990 – Demonstração do primeiro motor supercondutor, fios de até 10 metros utilizando material HTS (BSCCO).
- 1993 – Fios supercondutores de até 100 metros.
- 1997 – Demonstrado um transformador monofásico com potência de 1 MVA, empregando material supercondutor.
- 2003 – Prêmio Nobel para Abrikosov, Ginzburg e Leggett, por contribuições a teoria dos supercondutores e superfluidos.
- 2008 – Descoberta de ligas supercondutoras baseadas em ferro.

Pode-se observar que se trata de uma oportunidade tecnológica recente e que as primeiras aplicações da supercondutividade se deram em campos onde havia a necessidade da obtenção de altos campos magnéticos (da ordem de alguns Tesla), como no caso da medicina (1982). Características tão especiais acabam por sugerir este tipo de material como escolha natural para uma série de outras aplicações, na área de elétrica, eletrônica e transportes. Há aplicações onde o uso da supercondutividade possibilita aperfeiçoamento nos dispositivos já existentes, e, mais que isso, há a possibilidade de aplicações novas. O foco da presente tese estará concentrado em aplicações no setor elétrico, porém a metodologia do estudo poderá servir de base para posterior extensão para outros campos de aplicação de supercondutores.

## 1.1. Motivação

O impacto técnico provocado pelas novas ou aperfeiçoadas aplicações de dispositivos supercondutores no sistema elétrico precisa ser avaliado conjuntamente com a viabilidade econômica não somente do ponto de vista de instalação e manutenção, mas também na operação dos sistemas, que passam a ter novas características e funcionalidades. A correta avaliação permitirá que as aplicações chave possam ser definidas e os centros de pesquisa nacionais possam estabelecer suas linhas de pesquisa favorecendo o interesse nacional.

Até que ponto deve-se investir em desenvolvimento de novas tecnologias, fabricação, ou simplesmente aplicar a tecnologia já existente, esta é uma das questões que se coloca.

Outra questão é definir a demanda nacional, em nível de pesquisa e em nível de comercialização, frente aos agentes presentes e já atuantes no mercado, como as grandes corporações do ramo (American Superconductor e Zenergy, por exemplo [5, 6]) e os centros de pesquisa envolvidos. Entre os desafios para aplicação da tecnologia, podem ser citados seu custo, a necessidade de refrigeração, a confiabilidade e a aceitação por parte do mercado.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho tem como principais objetivos:

- Definir o atual estado da arte das principais aplicações da supercondutividade de alta temperatura (HTS) no setor elétrico.
- Determinar as aplicações consideradas mais promissoras para uso no sistema elétrico.
- Reunir e interpretar dados de mercado, que possibilitem uma avaliação sobre o impacto econômico e tecnológico decorrente destas novas e/ou aperfeiçoadas aplicações.
- Realizar uma avaliação qualitativa do uso de dispositivos baseados em materiais supercondutores de alta temperatura crítica, tomando como referência o sistema elétrico brasileiro.

- Desenvolver uma análise quantitativa, baseada em um cenário de referência a ser estabelecido, que possibilite discutir a oportunidade futura de uso, bem como seus benefícios.

### **1.3. Metodologia**

De modo a desenvolver este trabalho, pretende-se, inicialmente, realizar um acompanhamento tecnológico das principais aplicações da supercondutividade: ou seja, avaliar o estado da arte das aplicações. Esse acompanhamento deve contemplar as aplicações já comerciais, que podem ser verificadas através de catálogos e manuais dos fabricantes, mas deve levar em conta também aquelas que estão em pesquisa e desenvolvimento, que serão investigadas através de artigos técnicos e de publicações como a Superconductor Week [7], que veicula informações sobre supercondutividade e sistemas de criogenia.

Conhecendo-se as aplicações, pretende-se empregar duas metodologias: primeiramente aquela apresentada por Mullins [8], que é baseada em uma avaliação de três aspectos chave: mercado, indústria e equipe. A seguir, será empregada também a metodologia denominada análise SWOT, cuja sigla representa Forças (Strengths), Fraquezas (Weaknesses), Oportunidades (Opportunities) e Ameaças (Threats) [9, 10]. Tais avaliações serão realizadas visando demonstrar a existência de potenciais nichos de mercado para aplicações de supercondutividade.

O passo seguinte consiste em verificar a competitividade econômica das aplicações. Para tal, pretende-se empregar um modelo de simulação, de modo similar ao realizado por analistas e pesquisadores da área de energia e planejamento energético [11, 12, 13]. Estes estudos baseiam-se na definição de cenários de referência, que estimam a evolução das variáveis envolvidas no estudo em questão, de modo que um determinado modelo encarrega-se de fornecer a melhor opção de suprimento, respeitando determinadas restrições. Alguns exemplos típicos de variáveis são o consumo futuro de energia, o custo futuro da energia e emissões de gases de efeito estufa. Para esta análise, outras variáveis de influência, associadas à supercondutividade de alta temperatura, serão definidas.

## 1.4. Estrutura do texto

O primeiro capítulo deste trabalho apresentou os objetivos do estudo, a forma de abordagem do problema e a metodologia empregada para tratá-lo.

A seguir, no segundo capítulo, é realizado o trabalho de acompanhamento tecnológico, reunindo informações advindas de fabricantes e agentes envolvidos com supercondutividade de alta temperatura. As principais aplicações são apresentadas, assim como aplicações em potencial, reportadas em congressos da área e artigos.

O terceiro capítulo emprega a metodologia apresentada por Mullins [8] e uma análise do tipo SWOT, de modo a observar a existência de nichos de mercado para aplicações de supercondutividade de alta temperatura, sob uma ótica qualitativa. É apresentada também uma breve avaliação regional, abordando a tecnologia nas principais regiões do mundo e algumas das ações governamentais associadas.

Na sequência, o quarto capítulo apresenta uma avaliação quantitativa para a aplicação da tecnologia de supercondutividade de alta temperatura no sistema elétrico brasileiro, tomando como referência o modelo desenvolvido por Sheahen et al. [14]. Tal avaliação envolverá a parametrização do modelo com dados do sistema elétrico brasileiro, a definição de um cenário de referência para o período de tempo escolhido e os detalhes básicos sobre como preencher o modelo.

O quinto e último capítulo apresenta as conclusões do estudo e as sugestões para trabalhos futuros nesta linha de estudo.

# CAPÍTULO 2

---

## Avaliação Tecnológica

---

A tecnologia da supercondutividade vem sendo tratada por algumas publicações como uma das grandes descobertas científicas do século 20 [15]. Atualmente, as principais aplicações comerciais envolvem a medicina (ressonância magnética), física (aceleradores de partículas e reatores de fusão), entre outras. Na sua maioria, estas aplicações envolvem o uso de materiais supercondutores de baixa temperatura, e sua existência depende destes supercondutores, ou seja, o uso dos materiais supercondutores de baixa temperatura concentrou-se em aplicações onde somente com seu uso (supercondutores) estas puderam tornar-se tecnicamente factíveis. A questão econômica e a necessidade de refrigeração baseada em hélio tornaram-se fatores impeditivos para o uso desta tecnologia em situações onde existe concorrência dos materiais “convencionais”.

Entretanto, com o surgimento da supercondutividade de alta temperatura, este panorama foi alterado. Os custos de refrigeração foram reduzidos, viabilizando o uso do nitrogênio em detrimento da anterior necessidade de uso do hélio. Deste modo, o panorama de possíveis aplicações foi ampliado, incluindo agora aplicações em

transportes, telecomunicações, pesquisas científicas, novas aplicações em medicina, aplicações industriais e sistemas elétricos.

Para o caso destas novas aplicações, quatro fatores podem ser considerados como fundamentais: a redução dos custos para materiais HTS e sistemas de criogenia, a evolução técnica dos mesmos (materiais e sistemas de criogenia), a comprovação da confiabilidade destas aplicações, e a aceitação por parte do mercado [15].

Dentro do universo das novas aplicações, aquelas com foco no sistema elétrico foram consideradas para análise neste estudo, e assim, foi realizado um levantamento tecnológico, tomando como base o estado da arte das aplicações mais comuns nesta área. Além destas aplicações mais tradicionais, são apresentadas também expectativas de novos mercados. Como delimitado anteriormente, os mercados na área médica, eletrônica ou de instrumentação, por exemplo, não estão contemplados nesta tese.

## 2.1. Fios

A primeira aplicação é que serve como base para as subsequentes é o desenvolvimento de fios. Devido à característica de resistência quase nula de materiais no estado supercondutor, torna-se possível o desenvolvimento de fios capazes de transportar energia com perdas resistivas desprezíveis. Considerando a diminuição de perdas, é possível a redução da área da seção transversal necessária ao transporte de blocos de energia. Os dados mostrados na Tabela 2.1 consolidam a informação e permitem algumas observações a respeito [16, 17].

Observa-se que materiais supercondutores possibilitam correntes extremamente elevadas, se comparados aos condutores tradicionais, de cobre. Além da questão do espaço, vale também citar a questão do peso: sistemas que utilizam fios HTS apresentam peso menor se comparados aos tradicionais. Deste modo, um mesmo sistema, quando utilizando materiais HTS, apresenta melhor relação de potência por unidade de volume [18, 1].

Os fios são classificados de acordo com a liga supercondutora empregada na sua fabricação. Atualmente, há duas gerações de materiais: a primeira geração (1G) é baseada na liga  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ , chamada normalmente de Bi-2223, com temperatura crítica de  $-163\text{ }^\circ\text{C}$ . O fio supercondutor é obtido através da utilização de vários filamentos de material supercondutor, envoltos por uma liga de prata, numa tecnologia chamada de composto multifilamentar [3]. A prata é necessária de modo que o material

torne-se mais flexível. No ano de 2004, a capacidade de produção, no mundo, destes fios, já ultrapassava os 1.000 km [7].

**Tabela 2.1.** Comparação da corrente nominal de fios de cobre e supercondutores

Condutor de cobre		Fio Supercondutor (1G)	
Bitola (mm <sup>2</sup> )	Corrente (A)	Bitola (mm <sup>2</sup> )	Corrente (A)
120	350	120	12.840
240	530	240	25.680

**Fonte:** “<http://www.copper.org/applications/busbar/homepage.html>”, acesso em 10/08/2012  
 “[http://www.amsc.com/solutions-products/hts\\_wire.html](http://www.amsc.com/solutions-products/hts_wire.html)”, acesso em 10/08/2012

A segunda geração, por outro lado, é baseada na liga  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , sendo abreviada como YBCO ou Y-123, e com temperatura crítica de  $-183\text{ }^\circ\text{C}$ . Ainda não há escala comercial de fabricação para este tipo de fios, entretanto, estima-se que seu custo de fabricação será até cinco vezes menor que o de fabricação da tecnologia atual [5, 19]. Sua fabricação é baseada em tecnologia de fio revestido [5, 19]. Os fios da segunda geração são superiores não só na característica elétrica (condução de corrente) como também na característica mecânica (resistência).

Os limitadores de corrente, que serão abordados adiante, utilizam-se de uma característica dos cabos supercondutores: a própria corrente que atravessa o cabo é capaz de retirá-lo do estado supercondutor.

O material supercondutor empregado na fabricação dos fios pode também fazer-se presente sob a forma de blocos, no formato de anéis, por exemplo. Blocos compostos por material supercondutor podem ser empregados para levitação, limitadores de corrente, ou mesmo em alguns tipos de motores.

## 2.2. Cabos

Cabos supercondutores são desenvolvidos, basicamente, visando sistemas de transmissão e distribuição de eletricidade. Agregam como principal vantagem o fato de não apresentarem perdas. A energia anteriormente dissipada sob forma de calor passa a ser “comercialmente disponível”.

São constituídos, basicamente, por fios supercondutores, material de isolamento térmica, capa protetora, blindagem elétrica, um espaço destinado ao fluido de refrigeração (nitrogênio) e um núcleo, responsável pela rigidez mecânica [20].

Sua principal desvantagem é a necessidade de serem instalados juntamente a sistemas de criogenia, o que leva a um maior esforço de manutenção.

Nas áreas urbanas, há um crescente problema de espaço físico, devido à expansão do consumo e a dificuldade de instalação de novos sistemas. Situações como esta também favorecem a presença de sistemas supercondutores, pois estes possibilitam transportar mais energia utilizando o mesmo espaço.

Projetos de demonstração têm sido implementados pelo mundo, o que comprova a viabilidade técnica do uso de sistemas de transmissão com cabos supercondutores. Os três programas mais importantes até o momento estão em andamento nos EUA, no Japão e na Dinamarca [21]. Na Tabela 2.2 são apresentadas informações a respeito dos principais sistemas de transmissão deste tipo, atualmente em operação no mundo.

O projeto intitulado “Três Amigas”, não apresentado na Tabela 2.2, devido a não estar ainda construído e operando, prevê o uso de um sistema de transmissão supercondutor, em corrente contínua (HVDC), visando à interligação dos três sistemas elétricos básicos atualmente em operação nos EUA. Entre os principais benefícios esperados, o projeto é apontado como sendo fundamental para viabilizar a instalação de mais empreendimentos de geração baseados em energias renováveis, pois com esta interligação, empreendimentos instalados em qualquer um dos três sistemas poderão vender para os outros dois. Também são citados o potencial aumento de estabilidade de funcionamento do sistema e a possibilidade de redução de emissão de gases de efeito estufa [23]. A primeira fase do projeto está prevista para entrar em operação no ano de 2016 [24].

Deve ser observado que, além de sua aplicação na transmissão de energia, fios e cabos empregando material supercondutor são base para várias outras aplicações, como é o caso de motores, geradores e transformadores.

**Tabela 2.2.** Sistemas de transmissão empregando cabos HTS.

<b>Ano</b>	<b>Localidade</b>	<b>Fabricante do Cabo</b>
2004	Yunnan, China	InnoPower
2004	Chubu Electric (Japão)	Furukawa
2004	Korea	LS Cable

2005	Lanzhou, China	Chang Tong
2006	KEPRI, Korea	Sumitomo Electric
2006	Niagara Mohawk	Sumitomo Electric
2006	American Electric Power	Ultera
2006	Keyspan / LIPA	Nexans / AMSC
2006	Mexico City	Condumex
2007	Korea	LS Cable
2007	Moscow	VNIIKP
2008	ConEdison / New York City	Southwire Company

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com dados da referência [21].

## 2.3. Transformadores

O princípio de funcionamento dos transformadores está associado à lei da indução eletromagnética. Embora o princípio de funcionamento não tenha sofrido alterações nas últimas décadas, sua evolução foi observada na diminuição das perdas, que caíram de cerca de 50% desde 1950 até os dias atuais [25]. Atualmente, o uso da supercondutividade em transformadores é uma alternativa para que seja mantida esta tendência de redução de perdas.

O uso de enrolamentos compostos por material supercondutor possibilita uma maior corrente, quando comparado ao uso de cobre, e por consequência, torna-se possível a obtenção de campos magnéticos mais elevados no transformador sem a necessidade de ocupar mais espaço ou aumentar o peso [26]. A redução de peso e volume do dispositivo também reduz o esforço necessário a sua instalação.

Transformadores convencionais utilizam óleo para refrigeração. Entretanto, este tipo de sistema de resfriamento não atende às necessidades de criogenia do dispositivo empregando supercondutores. Deste modo, o óleo mineral é substituído pelo nitrogênio. Esta mudança acarreta um efeito colateral benéfico, já que o problema da destinação do óleo mineral usado, atualmente em transformadores, deixa de existir no caso de uso do nitrogênio [20].

O estudo do uso da supercondutividade em transformadores não é recente. Em 1981, por exemplo, foi publicado um estudo conceitual sobre o ciclo de vida completo de um transformador supercondutor de 1.000 MVA, empregando material LTS. Na

ocasião, o autor concluiu que, o ganho de rendimento seria suficiente para viabilizar economicamente o dispositivo [27]. Vale observar aqui a presença de uma economia de escala, pois a redução de perdas será maior em transformadores maiores.

No mundo, algumas experiências neste ramo já foram desenvolvidas, tanto utilizando supercondutores de baixa temperatura como também os de alta temperatura. Um dos exemplos de aplicação de um transformador desse tipo foi realizado por um consórcio entre a ABB e a EDF, que, em 1998, conectaram ao sistema elétrico da Suíça, um transformador supercondutor de 630 kVA, com tensões de primário e secundário de 18,7 kV e 420 V, respectivamente [28].

Outra particularidade dos transformadores supercondutores é a possibilidade de inclusão, no mesmo dispositivo, de uma função limitadora de corrente. Por exemplo, um SFCLT, ou *Superconducting Fault Current Limiting Transformer*, foi apresentado em [29], e além da função de transformação, incluía a função de limitador de corrente, possibilitando inclusive melhoria na estabilidade do sistema elétrico.

## 2.4. Motores e Geradores

O uso de enrolamentos supercondutores na fabricação de motores e geradores possibilita a obtenção de máquinas com uma melhor relação de potência por unidade de volume ( $W/m^3$ , por exemplo). A aplicação em motores e geradores apresenta, como no caso dos transformadores, a possibilidade de construção de dispositivos de menor peso e volume [30, 31].

Em aplicações que envolvem motores, essa virtude é particularmente importante, já que questões de espaço e peso podem tornar-se críticas em alguns casos, como na indústria naval e aeronáutica [32].

No caso dos geradores, o fator peso pode acarretar na diminuição do esforço de instalação. Tomando-se como exemplo uma turbina eólica, a redução de peso no gerador tornaria a instalação mais simples, assim como diminuiria os requerimentos das torres de sustentação.

Assim como no caso dos transformadores, citados na seção anterior, máquinas deste tipo apresentam melhoras no seu rendimento global, já que as perdas ôhmicas são próximas de zero. Por consequência, a mesma característica de economia de escala é observada para motores e geradores. Máquinas de maior potência nominal tendem a ser mais vantajosas do ponto de vista econômico, caracterizando economias de escala.

Pesquisas nessa área envolvem ainda diferentes topologias para construção dos motores e geradores, como por exemplo, o uso de supercondutores pode ser considerado para o estator ou para o rotor [30].

## **2.5. Limitadores de Corrente**

Limitadores de corrente, por definição, são dispositivos que devem atuar no caso de descargas ou situações de curto circuito, de modo a proteger sistemas elétricos de transmissão ou distribuição. Descargas e falhas podem ser ocasionadas, por exemplo, por quedas de árvores ou descargas atmosféricas [3]. São dispositivos tidos como muito promissores para aplicações em sistemas de distribuição e transmissão [33]. Atualmente, os sistemas de proteção são baseados em disjuntores, que desconectam as partes defeituosas do sistema no caso de distúrbios.

Nos sistemas interligados, os níveis de corrente de curto-circuito aumentam. Existem situações em que os disjuntores instalados ou mesmo os disponíveis no mercado não são mais capazes de interromper as correntes de falta. Os limitadores de corrente atuam diminuindo o nível de corrente de curto-circuito de modo a permitir a abertura segura dos disjuntores.

O uso de limitadores de corrente supercondutores permitiria ainda diminuir o número de operações dos disjuntores, pois os limitadores poderiam absorver picos de energia devidos a descargas, que levariam a manobras dos disjuntores. Isto aumenta a confiabilidade e disponibilidade do sistema elétrico.

Um protótipo de limitador deste tipo foi desenvolvido na Alemanha, e já se encontra em período de testes, em campo. Sua tensão e potência nominais são de 10 kV e 10 MVA [7].

## **2.6. Mancais Magnéticos**

A característica diamagnética dos materiais supercondutores, ou seja, sua capacidade de expulsar campos magnéticos pode ser utilizada para possibilitar a construção de mancais magnéticos, utilizando ímãs permanentes [33, 34]. Mancais deste tipo podem substituir os mancais convencionais, com a vantagem de apresentarem

perdas por atrito muito baixas ou até mesmo nulas, já que podem funcionar sem contato mecânico, baseados em levitação magnética [34].

Dentre as aplicações envolvendo mancais magnéticos, pode-se citar o *flywheel* [20], um dispositivo mecânico capaz de armazenar energia sob a forma de energia cinética em “volantes”. O uso de mancais com baixo ou nenhum atrito permite atingir velocidades mais elevadas. Sendo a energia cinética proporcional ao quadrado da velocidade da massa (volante) girante, os aumentos de velocidade obtidos com o uso de mancais magnéticos culminam em aumentos quadráticos da energia armazenada.

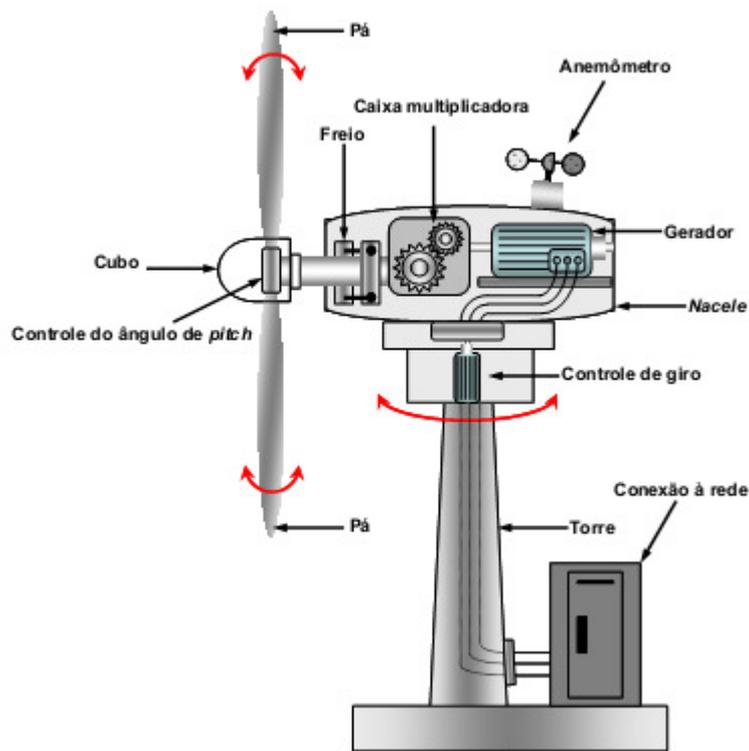
## **2.7. Exemplos de Aplicações**

As aplicações apresentadas anteriormente são “genéricas”, de modo que são aplicáveis em diferentes pontos do sistema, possibilitando vantagens. Aqui são apresentados impactos das aplicações de supercondutividade em nichos específicos, ou seja, alguns exemplos de aplicação encontrados na literatura.

### **2.7.1. Aplicação em geração eólica**

A energia eólica é decorrente do aquecimento diferenciado da atmosfera, devido ao fato de que a radiação solar não se distribui uniformemente sobre a Terra. Sendo oriunda da radiação solar, pode-se afirmar que a energia eólica é totalmente limpa, e renovável. O Comitê Internacional de mudanças climáticas fala, no âmbito europeu, em gerar 10% de toda a energia demandada através do vento [35, 36, 37].

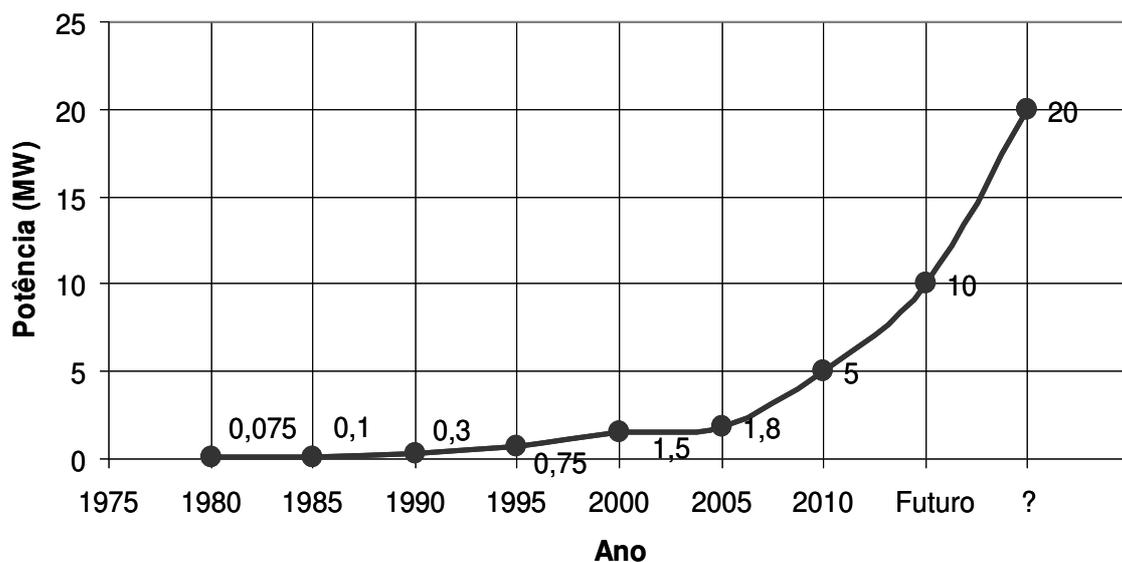
O gerador é o responsável por receber a energia mecânica em seu eixo, e convertê-la em energia elétrica. A energia mecânica, por sua vez, é capturada através do uso de pás, que podem estar em diferente número e apresentar diferentes arranjos, sendo comum o uso de aerogeradores de eixo horizontal e três pás [36]. O conjunto das pás e do gerador é o principal fator de definição da potência nominal do sistema completo. A Figura 2.1 apresenta a representação típica das partes componentes de um aerogerador.



**Figura 2.1:** Esquema de um aerogerador típico e suas principais partes. **Fonte:** Elaborado pelo autor, com base em [36].

No decorrer dos anos, diferentes estudos e “previsões” foram realizados para a evolução da potência nominal de aerogeradores, como, por exemplo, aquele mostrado na Figura 2.2.

### Evolução dos Aerogeradores



**Figura 2.2:** Evolução da potência nominal dos Aerogeradores. **Fonte:** Elaboração do autor, com dados extraídos de [118].

Contrariando alguns destes estudos, inclusive este apresentado, o aumento de potência nominal sugerido para 2010 já foi alcançado e superado muito antes. Uma das explicações para este fenômeno foram políticas de incentivo a pesquisas nesta área realizadas em diversos países, destacando-se a Espanha e Alemanha. Atualmente, há disponibilidade comercial de aerogeradores com potência nominal de 6 MW e rotores com diâmetro de até 134 metros [37].

O aumento da potência nominal acarreta em sistemas com um volume e peso cada vez maiores e de economicidade mais complexa, já que os custos de instalação também se tornam mais elevados, juntamente com o tamanho do sistema.

Uma solução, em uso atualmente, é a eliminação da caixa de engrenagens. A viabilidade desta solução está associada à disponibilidade de geradores elétricos capazes de trabalhar em velocidades baixas e com alto torque, ou seja, geradores multipólo. Entretanto, geradores desta natureza são caracterizados por grande aumento no seu volume e peso. De acordo com [38], o torque no rotor pode ser definido como

$$M = \frac{P}{\omega}. \quad (2.1)$$

A diminuição da velocidade de rotação,  $\omega$ , é consequência da retirada da caixa de engrenagens. Deste modo, a potência do gerador seria diminuída. A alternativa é utilizar um gerador de maior volume e peso (multipólo), de modo a compensar a redução. Assim, para uma mesma potência, há necessidade de uso de geradores maiores [39]. O volume de uma máquina elétrica, para uma determinada tecnologia de fabricação, está relacionada a seu torque.

Uma solução, que vem sendo debatida por centros de pesquisa e empresas, é a aplicação de material HTS na fabricação dos geradores elétricos para aerogeradores [39, 40]. Motores elétricos convencionais têm campo magnético limitado pela saturação do ferro, o que vem a ocorrer em valores da ordem de 1 T. As altas densidades de corrente possibilitadas pelos supercondutores permitem a obtenção de campos magnéticos mais altos, chegando a valores da ordem de 5 a 7 T. Valores desta ordem permitem a construção de máquinas elétricas menores e com uma melhor relação volumétrica de potência ( $W/m^3$ , por exemplo). A não necessidade do uso de ferro permite também o uso de materiais mais leves na estrutura da máquina [6], diminuindo ainda mais o volume e peso do gerador.

O uso do gerador HTS acarreta no acréscimo de mais um dispositivo no aerogerador, e mais uma parcela de perda: o sistema de criogenia. Apesar disso, vale lembrar que as perdas ôhmicas são minimizadas, chegando próximas a zero, o que leva a um aumento na eficiência global do gerador.

### **2.7.2. Sistemas de Transmissão Avançados**

Com o sucessivo aumento da demanda mundial de energia, os sistemas elétricos de transmissão e distribuição ganham atenção. Estes precisam ser cada vez mais confiáveis e sua potência nominal aumenta com taxas cada vez maiores.

Entretanto, a expansão dos atuais sistemas de transmissão e distribuição torna-se mais complexa com o aumento do “congestionamento urbano”, decorrente da instalação de um número cada vez maior de condutores elétricos, necessários ao fornecimento da crescente demanda de energia.

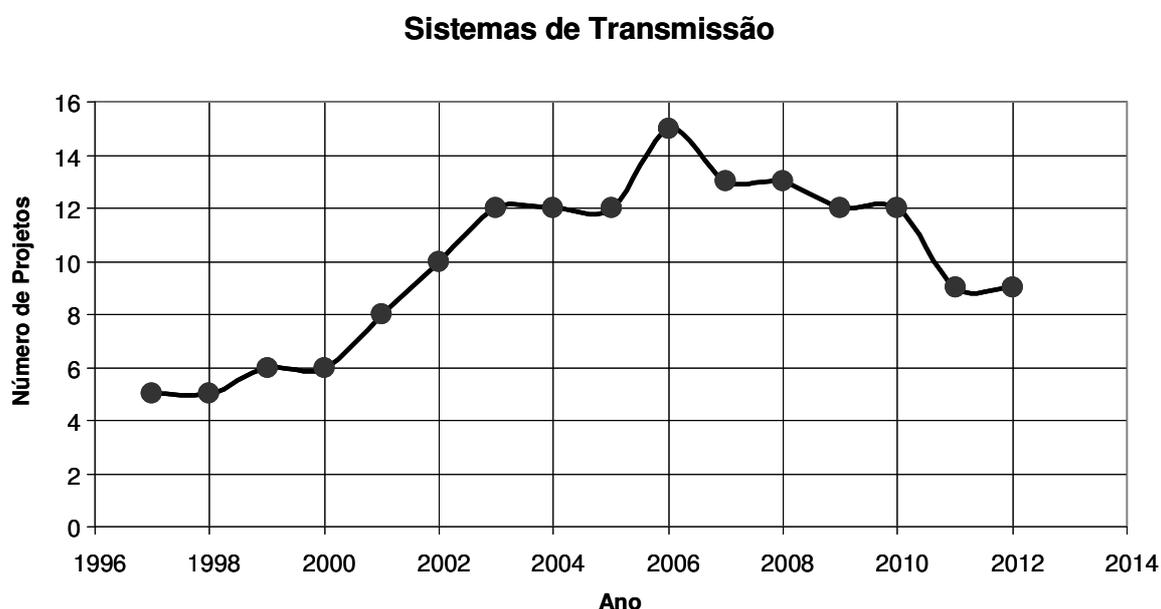
O uso de tecnologia HTS possibilita reduzir a área da secção transversal do condutor, assim como seu peso. Cabos deste tipo podem transportar até cinco vezes mais energia elétrica que a solução tradicional, tornando uma mesma área suficiente para transportar blocos maiores de energia elétrica [21].

Além da redução do volume e peso, existe ainda a vantagem da redução de perdas de transmissão, tornando-se esta energia, anteriormente perdida sob a forma de calor, em energia disponível ao consumo. É um potencial de expansão da oferta que existe e não requer construção de novos empreendimentos de geração, construção esta dependente de uma série de fatores legais e com inegáveis efeitos ambientais.

A redução das perdas nos sistemas de transmissão possibilita ainda uma redução nos elevados níveis de tensão necessários a estes sistemas. Alguns estudos apontam para possibilidade de transmissão de energia já em níveis de tensão adequados ao consumidor final [21], já que a elevação da tensão para transmissão tem como um de seus principais motivos a diminuição de perdas.

A questão da confiabilidade também é favorecida. Sistemas de transmissão supercondutores, devido às características físicas do estado supercondutor, apresentam um sistema natural de limitação de correntes de falta. O aumento da corrente numa situação de falta é capaz de elevar o campo magnético e a elevação do campo magnético é uma das maneiras de levar o material do estado supercondutor de volta para o estado condutor normal, limitando a corrente [21].

Alguns sistemas deste tipo estão em operação atualmente no mundo, em caráter de demonstração [21, 41]. A Figura 2.3 apresenta a quantidade destes projetos ao longo dos últimos anos.



**Figura 2.3:** Demonstrativo dos projetos de sistemas de transmissão. **Fonte:** Elaboração do autor, com dados extraídos das referências [28, 29].

Estes sistemas demonstrativos visam verificar a viabilidade de substituição de sistemas atuais, procurando investigar também as implicações práticas, como por exemplo, os benefícios e reais necessidades do uso de dois sistemas de criogenia em paralelo, o que permite a manutenção do sistema sem um desligamento.

No dia 30 de abril de 2008, em Long Island, nos Estados Unidos, uma parceria entre a concessionária de energia local (LIPA) e a American Superconductor (AMSC) colocou em operação o primeiro sistema de transmissão baseado em supercondutores de alta temperatura, conectado a rede elétrica comercial. O sistema apresenta tensão nominal de 138 kV. Os cabos foram projetados e montados pela Nexans, com fios fornecidos pela AMSC. O sistema tem cerca de 610 metros de comprimento (2000 pés), e o sistema de criogenia, fornecido pela Air Liquide, é baseado em nitrogênio líquido. A potência nominal é de 574 MW e a corrente é de 2400 A por fase. O custo do projeto foi de 60 milhões de dólares, sendo uma parte financiada pelo departamento de energia norte americano (DOE). O êxito de projetos deste tipo pode impulsionar a instalação de mais sistemas dessa natureza, ampliando o mercado.

### **2.7.3. Fornos de Indução**

A presença de fornos na indústria não é recente e eles são reconhecidos como grandes consumidores de eletricidade, de modo que atividades como siderurgia e metalurgia são extremamente intensivas em energia.

Fornos de indução, em especial, têm seu uso iniciado por volta de 1920 [42]. Este tipo de forno tem como princípio de funcionamento a indução eletromagnética, sendo o metal aquecido e levado a alta temperatura, próxima ou igual ao seu ponto de fusão, através de correntes induzidas.

Os fornos de indução convencionais são capazes de induzir correntes em materiais condutores, através da exposição destes a campos magnéticos variáveis no tempo. A variação do campo magnético induz correntes no material, que é aquecido devido a sua resistividade.

Por volta dos anos 90, um novo método para fornos de indução foi apresentado, baseado no uso de corrente contínua. Entretanto, este método depende do uso de imãs não disponíveis na tecnologia da época [42]. Entretanto, tais imãs tornaram-se realidade através dos progressos obtidos com supercondutividade, viabilizando então esta nova tecnologia de fornos de indução.

Comercialmente, a fabricante Zenergy, atuante na área de supercondutividade, em parceria com a empresa Bültmann [43], especialista em máquinas especiais, lançaram no mercado fornos de indução que utilizam esta nova tecnologia baseada em imãs, empregando material HTS.

O rendimento típico de fornos de indução convencionais fica em torno de 45%, por conta de perdas ôhmicas nos enrolamentos. O sistema baseado em material HTS, de acordo com o fabricante, atinge rendimento da ordem de 90% [42]. A economia de energia advinda desta melhora de rendimento, ainda de acordo com o fabricante, é suficiente para amortizar o investimento em cinco anos.

Esta aplicação foi apresentada e é considerada relevante para o caso brasileiro, já que as indústrias de siderurgia e metalurgia nacionais têm forte presença, afetando diretamente o consumo de energia elétrica total do país, assim como o PIB.

### **2.7.4. Aplicações em Transporte**

A principal aplicação da supercondutividade no setor de transportes é a exploração dos grandes campos magnéticos que podem ser obtidos com bobinas

supercondutoras, propiciando assim o desenvolvimento e aplicação de trens de levitação, do tipo MagLev (Superconducting MAGnetically LEVitated Vehicle).

O instituto japonês de pesquisa de trens (RTRI) iniciou pesquisas no ramo em 1970. O instituto já anuncio aplicações com sucesso de bobinas supercondutoras na linha de teste MagLev Yamanashi [44]. A característica diamagnética dos materiais supercondutores também pode ser explorada para levitação, entretanto, este tipo de aplicação ainda está limitado a laboratórios de pesquisa na área.

### **2.7.5. Armazenamento de Energia**

Através do uso de fios supercondutores, é possível implementar a topologia de um SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). O SMES armazena energia no campo magnético criado numa bobina supercondutora utilizando-se corrente contínua [14, 19, 45].

Um sistema SMES típico inclui três partes: uma bobina supercondutora, um sistema de condicionamento de energia (retificador-inversor) e o sistema de criogenia, responsável por ajustar a temperatura da bobina. Uma vez que a bobina esteja refrigerada e carregada, como não há perdas resistivas, a energia é armazenada. A descarga da energia é feita através do sistema de condicionamento. O rendimento global do sistema pode chegar a 95%.

Entre as vantagens do SMES, encontra-se sua dinâmica, muito rápida se comparada, por exemplo, a sistemas de armazenamento baseados em bombeamento de água. A energia elétrica está disponível quase de modo instantâneo, viabilizando seu uso inclusive para aplicações de qualidade de energia. Outra característica importante é a ausência de partes móveis, o que aumenta sua confiabilidade [19].

Um exemplo de aplicação de dispositivos SMES foi realizado no estado norte-americano de Wisconsin. Unidades do SMES foram instaladas para melhorar a estabilidade de um sistema de transmissão, devido a presença e operação de uma unidade de fabricação de papel, que deixa o referido sistema sujeito a grandes variações de tensão. A combinação das unidades resulta em uma capacidade de aproximadamente 20 MWh, capaz de suprir 40 MW por trinta minutos ou 20 MW por duas horas [46, 47, 48].

## **2.8. Conclusões Parciais**

Este capítulo tratou de apresentar uma avaliação tecnológica acerca de algumas das aplicações de supercondutividade de alta temperatura, especialmente aquelas consideradas mais promissoras e aquelas que estão de alguma forma ligadas ao sistema elétrico. Através de dados obtidos na literatura, e ainda informações de fabricantes, o estado da arte foi levantado. Foram destacados os progressos na área de fios, cabos, transformadores, motores e geradores, limitadores de corrente, mancais magnéticos, aplicações em aerogeradores, sistemas de transmissão avançados, fornos de indução, aplicações em transporte e armazenamento de energia.

Foram identificados protótipos, em teste, de praticamente todas as aplicações, com exceção de aplicações em aerogeradores e sistemas de transmissão avançados. A presença dos protótipos, em operação, é um argumento para confirmar o aspecto das vantagens técnicas da tecnologia de supercondutividade, porém, o seu número ainda reduzido também mostra que seu custo ainda é elevado. Estes primeiros protótipos são importantes, pois o seu desempenho pode balizar a confiança do mercado, com relação à possibilidade de substituição de tecnologia convencional.

# CAPÍTULO 3

---

## Análise Qualitativa

---

A realização da avaliação tecnológica, executada no capítulo 2, apresentou algumas das possibilidades de aplicações de materiais supercondutores, tanto em aplicações novas, quanto no aperfeiçoamento de dispositivos já existentes, permitindo observar que esta tecnologia apresenta vantagens técnicas sobre as convencionais. Esta afirmação também pode ser reforçada pelo exposto em [15]. De acordo com o autor, os recentes progressos em supercondutores seguem uma lógica similar àquela observada no desenvolvimento de novos materiais, como por exemplo, os semicondutores e a fibra ótica. A História mostra que o desenvolvimento das tecnologias que envolvem materiais apresenta riscos e incerteza, porém, produtos e aplicações decorrentes do uso destes novos materiais tendem a apresentar grandes benefícios para a sociedade em longo prazo. Visando avaliar a possibilidade de a tecnologia tornar-se realidade, de modo a permitir a apropriação, por parte da sociedade, destes benefícios, a realização de uma análise qualitativa aqui proposta segue a linha de avaliar a tecnologia sob uma ótica similar àquela usual para oportunidades de negócio. Conforme definido no capítulo 1, a tecnologia de supercondutividade, especificamente de alta temperatura, é uma

oportunidade recente, e, portanto, ainda passível do processo de amadurecimento e penetração no mercado.

A realização da avaliação poderia seguir alguns métodos de análise, como por exemplo, a análise custo-benefício [49]. Porém, foram selecionados dois métodos tipicamente utilizados para avaliação de oportunidades de negócio. Primeiramente, o método proposto por Mullins [8], que apresenta como metodologia para realizar a avaliação de potencial de um negócio e verificar suas “chances de sucesso”, o uso do tripé classificado como: Mercado-Indústria-Equipe. É uma abordagem tipicamente utilizada para uma oportunidade de negócio, porém, que será utilizada de uma maneira nova, adaptada para avaliar uma nova tecnologia, com potencial para apresentar diversas oportunidades de negócio.

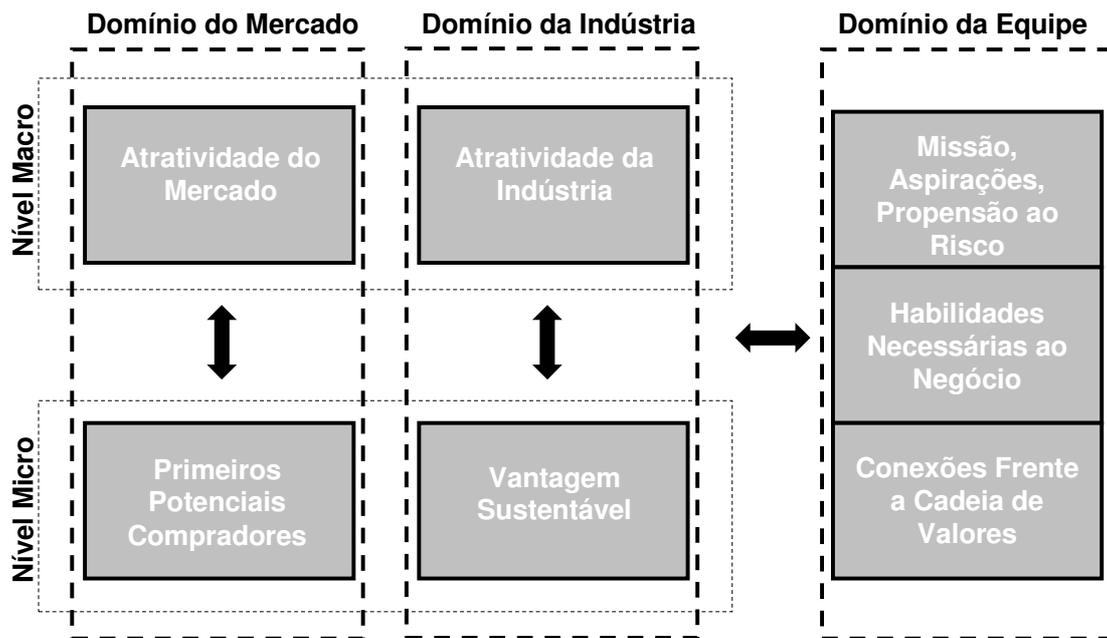
O segundo método proposto para avaliação foi a análise SWOT, cuja sigla representa Forças (Strengths), Fraquezas (Weaknesses), Oportunidades (Opportunities) e Ameaças (Threats) [10]. Esta ferramenta tipicamente é utilizada para fazer análise de cenários, sendo usada como base para gestão, planejamento estratégico e tomadas de decisão no âmbito de uma corporação ou empresa, mas podendo, devido a sua simplicidade, ser utilizada para qualquer tipo de avaliação de cenário. Aqui, o cenário considerado é a maturação da tecnologia da supercondutividade de alta temperatura, e sua consequente disponibilidade comercial.

Além das avaliações citadas, foi incluída também uma breve avaliação regional, considerando-se os EUA, Europa, Japão e Brasil, visando fornecer parâmetros de comparação entre as diferentes regiões, e ainda, apresentar brevemente algumas das iniciativas governamentais associadas à tecnologia nas referidas regiões.

### **3.1. Avaliação Mercado-Indústria-Equipe**

O método de avaliação “mercado-indústria-equipe”, apresentado por Mullins [8], está relacionado a fatos que devem ser considerados por empreendedores e executivos ao escrever um plano de negócios. A abordagem é também conhecida como método dos sete domínios, sendo representada pela Figura 3.1.

A Figura 3.1 mostra que, o tripé original, considerado na análise, envolve subdivisões: duas para mercado, duas para indústria e três para equipe. Estas partes menores justificam a nomenclatura como método dos sete domínios.



**Figura 3.1:** Método dos sete domínios. **Fonte:** Elaborado pelo autor, Adaptado de Mullins [8].

De acordo com o autor, outra categoria de potenciais leitores do livro envolve engenheiros e inventores que dispõem de idéias ou tecnologias que podem ser expandidas para algo além de um único produto. Ajustando-se à supercondutividade de alta temperatura a este caso, o método foi considerado para avaliação. Entretanto, estudando-se os sete domínios apresentados, esta abordagem revela-se completa e adequada para uma oportunidade de negócio, e não para toda uma tecnologia.

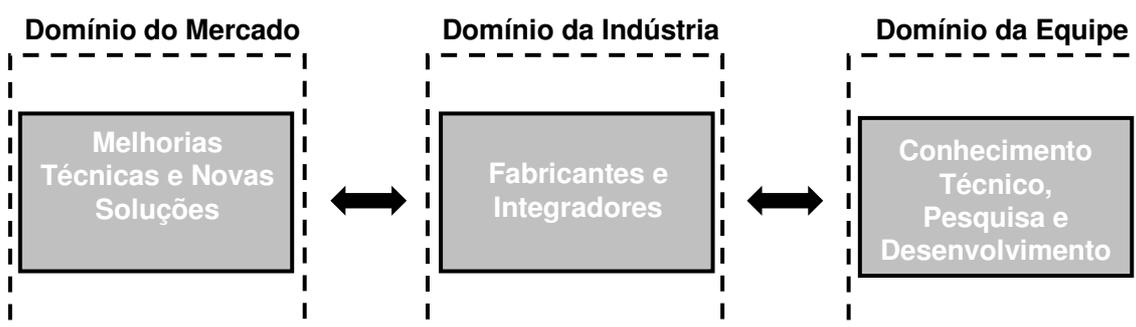
No caso do domínio do mercado, a atratividade do mercado está em nível macro, enquanto o nível micro envolve os primeiros potenciais compradores. No caso da tecnologia, como são diferentes produtos e oportunidades, optou-se por mesclar ambos os domínios, em um único domínio chamado mercado, e relacionado à possibilidade de oferecimento, por parte da tecnologia em avaliação, de melhorias técnicas e novas soluções. Por exemplo, no caso da supercondutividade de alta temperatura no sistema elétrico, os cabos supercondutores, aplicados a sistemas de distribuição, viabilizam a redução do congestionamento urbano e ampliação da capacidade da rede sem necessidade de ocupar mais espaços que o sistema atual.

Com respeito ao domínio da indústria, o domínio macro está relacionado à disponibilidade de fornecedores da tecnologia, enquanto o domínio micro está ligado à sustentabilidade do negócio perante os possíveis concorrentes. Por exemplo, uma patente pode ser uma barreira à entrada de novas empresas em determinado ramo. Novamente, como se trata de uma nova tecnologia, o foco da avaliação é um pouco

diferente, e a proposta é envolver, neste caso, a disponibilidade de fabricantes e integradores para a nova tecnologia, em um domínio único chamado indústria.

O domínio equipe é dividido em três subdomínios, que visam abordar questões típicas acerca de recursos humanos, tanto do ponto de vista pessoal (missão, aspirações, e propensão ao risco), quanto técnico (habilidades necessárias ao negócio) e ainda, sobre sua habilidade em estar conectado ao negócio e avaliar necessidades de mudança (conexões frente à cadeia de valores). Para avaliação da tecnologia completa, como se trata de uma nova oportunidade, ainda em desenvolvimento, consideraram-se, nesta análise, como pontos favoráveis, a presença de pessoal técnico qualificado, bem como da realização de atividades de pesquisa e desenvolvimento em laboratórios e centros de pesquisa, mesclando os três domínios em apenas um, chamado de equipe.

A realização das simplificações, visando atender a avaliação não de uma oportunidade de negócio, mas sim de uma tecnologia completa, está apresentada na Figura 3.2.



**Figura 3.2:** Método dos três domínios. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Baseado nesta metodologia simplificada será apresentado, através de números, o comportamento destes três elementos, associados às aplicações de supercondutividade de alta temperatura, com foco no sistema elétrico.

Resumindo-se o que foi exposto, o estudo da expansão das aplicações é o que será inserido no conceito de mercado, envolvendo ainda possíveis melhorias técnicas e novas soluções, de forma a trazer o benefício de uma economia de escala para o ramo. Centros de pesquisa e empresas estão empenhados em definir aplicações viáveis comercialmente para a supercondutividade, assim como qualificar o pessoal técnico, que juntamente com atividades de pesquisa, estão associados ao conceito de equipe. Dada a existência de uma demanda para as aplicações, e de um nicho de mercado onde elas possam ser inseridas, deve-se então aplicar o conceito de indústria, que está ligado

à capacidade dos meios de produção em atender a demanda, gerada por consumidores e integradores de tecnologia.

### **3.1.1. Mercado**

O conceito de mercado está associado à disponibilidade de potenciais consumidores e potenciais aplicações para a tecnologia. Tomando-se como exemplo os fios e cabos supercondutores, é uma tecnologia que pode solucionar um problema crônico da atualidade, que é o congestionamento dos sistemas de distribuição urbanos. Utilizando as mesmas dimensões do sistema atual, e ainda um peso menor, uma configuração com cabos supercondutores poderia transportar mais energia. Pode-se inferir daí que um sistema com cabos supercondutores é uma solução em potencial, e tem um nicho no mercado, que pode vir a ser explorado.

Para estabelecer o contato com este mercado, este trabalho adotará, como uma das principais referências, uma publicação da Peregrine Communications, a Superconductor Week [7]. De acordo com os editores, esta publicação provê informações sobre tecnologia e comercialização relativas à supercondutividade e criogenia, seja em pequena ou larga escala, e até mesmo para protótipos. Além da Superconductor Week, também serão consultados artigos, através da base IEEE [50] e da base Elsevier [51].

Apesar da existência do nicho de mercado, ou seja, da oportunidade, a exploração depende de outros fatores, merecendo atenção especial o fator econômico. No caso da supercondutividade, além do fator econômico, pode ser observado também o apelo ambiental e de eficiência energética.

O mercado para aplicações de supercondutividade, inicialmente, despontou para aplicações novas, pesquisa e aplicações onde se deseja alto desempenho, como aplicações militares. A seguir, abriu-se a possibilidade para aplicações onde aparelhos empregando materiais supercondutores apresentam desempenho muito acima de outras tecnologias, como é o caso de aparelhos de diagnóstico para medicina, onde são necessários campos magnéticos de valor elevado. Este ramo do mercado foi dominado, basicamente, por materiais do tipo LTS, ou seja, materiais supercondutores de baixa temperatura crítica.

O estudo apresentado pelo CONECTUS [52] (Consortium of European Companies Determined to Use Superconductivity), consórcio de empresas européias

determinadas a utilizar supercondutividade, sobre mercado mostra uma posição forte dos supercondutores de baixa temperatura, especialmente aplicados a equipamentos de ressonância magnética. A Tabela 3.1 apresenta os resultados.

**Tabela 3.1.** Mercado Global para Supercondutividade, em Milhões de Euros.

<b>Ramo de Aplicação</b>	<b>Ano 2011</b>	<b>Ano 2012</b>	<b>Ano 2014</b>	<b>Ano 2016</b>
Pesquisa e Desenvolvimento (P & D)	920	945	1030	1115
Ressonância magnética	4050	4125	4230	4330
<b>Total P &amp; D e ressonância magnética</b>	4970	5070	5260	5445
Novas aplicações (larga escala)	50	55	80	125
Novas aplicações em eletrônica	60	60	80	95
<b>Total de novas aplicações (emergentes)</b>	110	115	160	220
<b>Total do Mercado</b>	5080	5185	5420	5665
Parcela LTS	5050	5155	5350	5535
Parcela HTS	30	30	70	130

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com dados extraídos de [52].

Observa-se, pelos números, que há um amplo domínio dos supercondutores de baixa temperatura. Entretanto, os representantes do consórcio esperam crescimento para os períodos representados, até 2016. Este crescimento está baseado, fundamentalmente no campo chamado de “novas aplicações”, que compreende aplicações em energia, informação, telecomunicações e transporte.

Espera-se que o avanço da supercondutividade de alta temperatura possa quebrar a barreira econômica formada até então. Basicamente, a necessidade de criogenia muito avançada, além da necessidade de investir-se no desenvolvimento de aplicações comerciais, formaram um entrave para o avanço em novos mercados, por parte dos materiais LTS, que aparentemente, atingiram o seu limite comercial. Atribui-se aos materiais HTS a possibilidade de superar esta barreira.

Apesar deste benefício óbvio da supercondutividade de alta temperatura, ou seja, a possibilidade de atingir o estado supercondutor em temperaturas mais altas, esta não é

a única restrição para o uso ou não de um material. Há de se considerar também a facilidade em lidar com o material, assim como suas propriedades mecânicas, pois estas são decisivas em aplicações práticas. Em outras palavras, a temperatura crítica não é o único parâmetro a ser considerado, quando se deseja selecionar um material supercondutor para aplicação.

### **3.1.2. Indústria**

O conceito de indústria envolve a capacidade tecnológica disponível para fabricação dos dispositivos. Ou seja, além do conhecimento da tecnologia, deve-se também investigar a capacidade dos meios de produção de suprir esta tecnologia para o mercado. Para que um novo sistema supercondutor, como é o caso daquele implantado em Long Island, já citado, seja implementado, deve-se dispor dos meios para fabricar o material supercondutor.

Além do esforço governamental, que é bastante relevante, muitas empresas também têm se empenhado em ingressar neste mercado. É importante observar que, as empresas envolvidas no ramo tanto atuam como indústria, já que fornecem material supercondutor, como também comercializam soluções que utilizam supercondutividade. Caso, por exemplo, da Zenergy [6], que tanto fabrica material supercondutor, como oferece soluções baseadas nos mesmos, como por exemplo, limitadores de corrente e fornos de indução.

É interessante observar a distribuição regional das empresas, e também, realizar um acompanhamento das empresas no mercado. A Tabela 3.2 apresenta as principais empresas presentes no mercado. A Figura 3.3 mostra um gráfico, classificando as empresas de acordo com sua região.

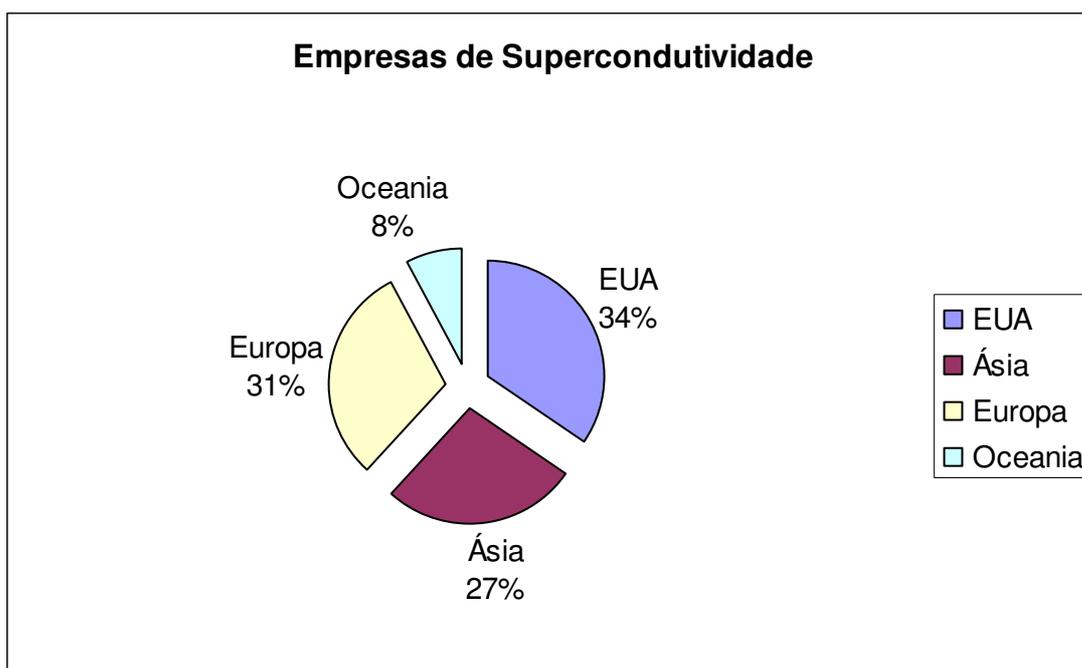
Observa-se pela listagem de empresas, que não somente novas empresas, como também empresas tradicionais têm investido em programas de pesquisa e desenvolvimento nesta área. Há uma posição de relativa liderança dos Estados Unidos em relação a outras partes do mundo.

Outro dado sobre a indústria atual foi demonstrado na Superconductor Week de 4 de junho de 2007 [7]. Foram publicados, na época, os mais recentes resultados da pesquisa de cabos supercondutores, com os respectivos comprimentos e correntes críticas já atingidos. O resultado é reproduzido a seguir, na Tabela 3.3.

**Tabela 3.2.** Empresas envolvidas com supercondutividade.

<b>Empresa</b>	<b>País/Região</b>
ABB	Suíça/Europa
Alstom	França/Europa
AMSC	EUA
Bruker	EUA
Chubu	Japão/Ásia
Condumex	EUA
Doosan	Coréia/Ásia
Furukawa	EUA
General Electric	EUA
HTS-110	Nova Zelândia/Oceania
Hypertech	EUA
Hyundai	Coréia/Ásia
Innopower	China/Ásia
LS Cable	Coréia/Ásia
Nexans	França/Europa
Oxford Instruments	Inglaterra/Europa
Siemens	Alemanha/Europa
Sumitomo	Japão/Ásia
Superpower (Philips)	EUA/Europa
Theva	Europa
Toshiba	Japão/Ásia
Ultera/SouthWire	Dinamarca/Europa
Varian	EUA
Waukesha	EUA
Zenergy	Austrália/Oceania

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com dados extraídos de [7].



**Figura 3.3:** Distribuição das empresas envolvidas com supercondutividade de acordo com região geográfica. **Fonte:** Elaborado pelo autor, com base nos dados da Tabela 3.2.

**Tabela 3.3.** Amostras de cabos supercondutores produzidas.

<b>País / Empresa</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Corrente Crítica (77 K)</b>
EUA/AMSC	95	>300
EUA/AMSC	6	363
EUA/AMSC	Amostra pequena	558
EUA/SuperPower	595	173
EUA/SuperPower	Amostra pequena	721
EUA/SuperPower	Amostra pequena	407
EUA/Los Alamos	4	109
EUA/Los Alamos	1	350
EUA/Los Alamos	Amostra pequena	1400
EUA/Oak Ridge	1	120
EUA/Oak Ridge	Amostra pequena	393
EUA/Oak Ridge	Amostra pequena	280
EUA/Oak Ridge	Amostra pequena	315
EUA/BNL	Amostra pequena	800
Ásia/Sumitomo	117	134

Ásia/Sumitomo	1	175
Ásia/Sumitomo	Amostra pequena	357
Ásia/Sumitomo	10	130
Ásia/Chubu	203	93
Ásia/Chubu	Amostra pequena	294
Ásia/Showa	200	200
Ásia/Fujikura	217	88
Ásia/Fujikura	105	126
Ásia/Fujikura	Amostra pequena	361
Ásia/ISTEC	212	245
Ásia/ISTEC	Amostra pequena	480
Ásia/ISTEC	56	250
Ásia/ISTEC	Amostra pequena	735
Europa/THEVA	37	158
Europa/THEVA	10	353
Europa/THEVA	1	422
Europa/EHTS	100	253
Europa/EHTS	1	481
Europa/Nexans	Amostra pequena	582
Europa/Edison SPA	2	120
Europa/Edison SPA	Amostra pequena	220
Ásia/KERI	4	97
Ásia/KERI	1	107
Ásia/KAIST	34	110
Ásia/KAIST	Amostra pequena	357
Ásia/KAIST	1	155

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com dados extraídos de [7].

A quantidade de inovações pode ser interpretado como indicativo de uma continuidade na pesquisa e fabricação de cabos. A indústria está empenhada em oferecer recursos ao mercado, demonstrando acreditar no seu potencial.

### 3.1.3. Equipe

Neste ponto, pode-se introduzir o conceito de equipe, que está associado ao pessoal capacitado para lidar com a tecnologia, no caso, a supercondutividade. Por tratar-se de uma área relativamente nova, ainda é bastante dependente da formação de pessoal em centros de pesquisa e laboratórios em universidades. Deste modo, para realização de uma análise da equipe disponível, há de se pensar nos centros de pesquisa e grupos de estudo envolvidos com supercondutividade.

A Superconductor Week mantém um cadastro, online, de centros de pesquisa envolvidos em supercondutividade e criogenia. A distribuição regional destes centros de pesquisa é mostrada abaixo, na Tabela 3.4 e na Figura 3.4.

**Tabela 3.4.** Grupos de Pesquisa.

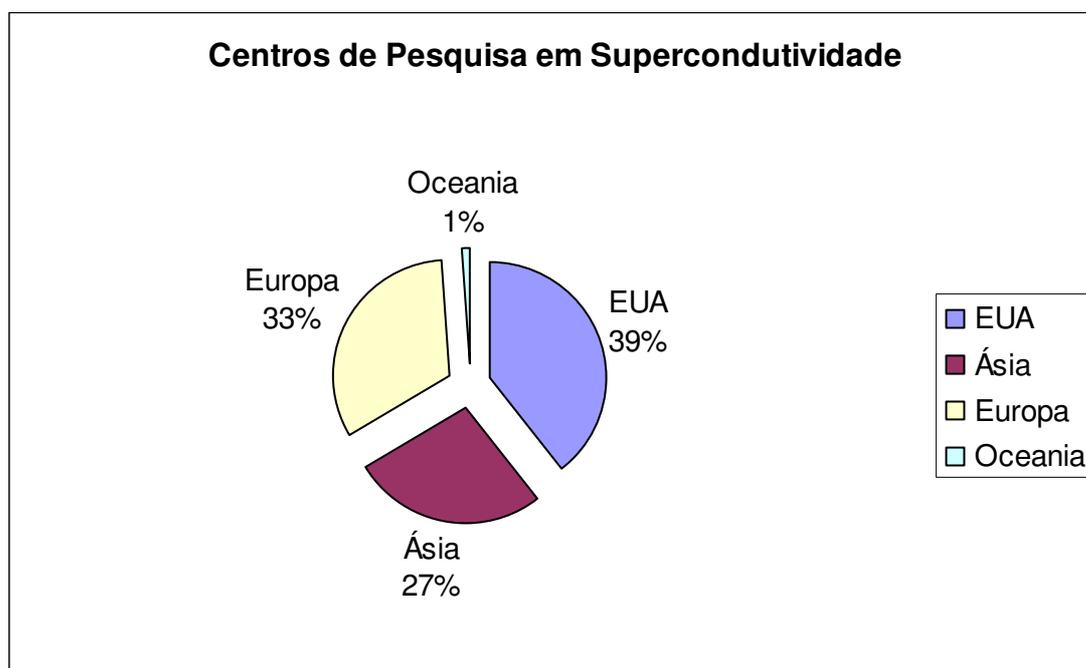
<b>Grupo</b>	<b>País / Região</b>
Applied Superconductivity & Training	Eslováquia / Europa
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	Japão
Argonne National Lab	EUA
B. Verkin Institute	Ucrânia
Bar-Ilan Institute of Superconductivity	Israel
Brock University	Canadá
Brookhaven National Laboratory	EUA
Chinese Academy of Sciences	China
CERN	Suíça
Chalmers University	Suécia
Coalition for the Commercial Application of Superconductors	EUA
College of William and Mary	EUA
Center for Superconducting and Magnetic Materials	Cingapura
Departement de Physique de la Matiere Condensee	França
Department of Energy	EUA
Deutsches Elektronen-Synchotron	Alemanha
Electric Power Research Institute	EUA

ETH	Suíça
European Society for Applied Superconductivity	Europa
Florida State University	EUA
Forschungszentrum Karlsruhe	Alemanha
Hokkaido University	EUA
ILL Research Institute	França
Institut De Ciencia De Materials	Espanha
Institut für Physikalische Hochtechnologie	Alemanha
Institut für Technische Physik	Alemanha
Institute for Chemical Technology of Inorganic Materials	Áustria
Institute of Low Temperature and Structure Research	Polónia
Iowa State University	EUA
ISTEC, International Superconductivity Technology Center	Japão
Japan Atomic Energy Research Institute	Japão
Jamia Millia Islamia University	India
Japan Science and Technology Corporation	Japão
Kagoshima University	Japão
KEK LHC-IRQ, Superconducting Magnet Group	Japão
Korea Basic Science Institute	Coréia
Kyoto University	Japão
Kyushu University	Japão
Lawrence Berkeley National Laboratory	EUA
Lawrence Livermore National Laboratory	EUA
Leibniz Institute for Solid State and Materials Research	Alemanha
Leiden University, Netherlands	Holanda
Los Alamos National Laboratory	EUA
Massachusetts Institute of Technology	EUA
Max-Planck-Institut für Plasmaphysik	Alemanha
Michigan State University	EUA
Midwest Superconductivity Consortium	EUA
National Institute of Fusion Science	Japão

National Institute of Standards and Technology	EUA
Niigata University	Japão
Northeastern University	EUA
Oak Ridge National Laboratory	EUA
Ohio State University	EUA
Penn State University	EUA
Pohang University	Coréia do Sul
Princeton University	EUA
Saitama University	Japão
Stanford University	EUA
State University of New York	EUA
Stony Brook Physics and Astronomy	EUA
Swedish Superconductivity Consortium	Suécia
Thomas Jefferson National Accelerator Facility	EUA
Tohoku University	Japão
Tokyo Institute of Technology	Japão
University at Buffalo	EUA
University of Alabama	EUA
University of Augsburg	Alemanha
University of Birmingham	Reino Unido
University of British Columbia	Canadá
University of California	EUA
University of Cambridge	Reino Unido
University of Durham	Reino Unido
University of Houston	EUA
University of Illinois	EUA
University of Leuven	Bélgica
University of Liege	Bélgica
University of London	Inglaterra
University of Maryland	EUA
University of Oslo	Noruega
University of Rome	Itália
University of South Carolina	EUA

University of Southampton	Reino Unido
University of Tokyo	Japão
University of Wollongong	Austrália
Universität Göttingen	Alemanha
Waseda University	Japão
Weizmann Superconductivity Lab	Israel
Yokohama National University	Japão

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com dados extraídos de [7].



**Figura 3.4:** Demonstrativo dos grupos de pesquisa pelo mundo. **Fonte:** Elaborado pelo autor, com base nos dados da Tabela 3.4.

Os dados apresentados permitem concluir que boa parte dos esforços e investimentos na área de supercondutividade ainda estão situados em universidades e centros de pesquisas governamentais, apesar do número crescente de empresas engajadas no ramo, empresas estas vistas na seção de indústria. A atuação das equipes é importante tanto no setor de pesquisa, como no setor de desenvolvimento.

Pode-se observar também que o resultado apresentado na seção anterior, a respeito das empresas de supercondutividade, está de acordo com o número observado para os centros de pesquisa.

Outro dado interessante, e que mostra a movimentação em torno do assunto, diz respeito a palestras e conferências sobre o tema. Há eventos programados até mesmo para 2014. A Tabela 3.5 apresenta alguns exemplos, dos principais eventos de supercondutividade, além de algumas informações históricas e futuras.

**Tabela 3.5.** Eventos relativos à supercondutividade.

<b>Nome do evento</b>	<b>Local</b>	<b>Período de realização</b>
ASC 1966	Brookhaven, NY (EUA)	09/11/1966 a 11/11/1966
ASC 1967	Austin, TX (EUA)	06/11/1967 a 08/11/1967
ASC 1968	Gatlinburg, TN (EUA)	28/10/1968 a 30/10/1968
ASC 1970	Boulder, CO (EUA)	15/06/1970 a 17/06/1970
ASC 1972	Annapolis, MD (EUA)	01/05/1972 a 03/05/1972
ASC 1974	Oakbrook, IL (EUA)	30/09/1974 a 02/10/1974
ASC 1976	Stanford, CA (EUA)	17/08/1976 a 20/08/1976
ASC 1978	Pittsburgh, PA (EUA)	25/09/1978 a 28/09/1978
ASC 1980	Santa Fe, NM (EUA)	29/09/1980 a 02/10/1980
ASC 1982	Knoxville, TN (EUA)	30/11/1982 a 03/12/1982
ASC 1984	San Diego, CA (EUA)	10/09/1984 a 13/09/1984
ASC 1986	Baltimore, MD (EUA)	23/09/1986 a 03/10/1986
ASC 1988	San Francisco, CA (EUA)	21/08/1988 a 25/08/1988
ASC 1990	Snowmass, CO (EUA)	24/09/1990 a 28/09/1990
ASC 1992	Chicago, IL (EUA)	23/08/1992 a 28/08/1992
ASC 1994	Boston, MA (EUA)	16/10/1994 a 21/10/1994
ASC 1996	Pittsburgh, PA (EUA)	25/08/1996 a 31/08/1996
ASC 1998	Desert Springs, CA (EUA)	13/09/1998 a 18/09/1998
ASC 2000	Virginia Beach, VA (EUA)	17/09/2000 a 23/09/2000
ASC 2002	Houston, TX (EUA)	04/08/2002 a 09/08/2002
ASC 2004	Jacksonville, FL (EUA)	03/10/2004 a 08/10/2004
ASC 2006	Seattle, WA (EUA)	27/08/2006 a 01/09/2006
ASC 2008	Chicago, IL (EUA)	17/08/2008 a 22/08/2008
ASC 2010	Washington, DC (EUA)	01/08/2010 a 06/08/2010

ASC 2012	Portland, OR(EUA)	07/10/2012 a 12/10/2012
ASC 2014	Charlotte, NC (EUA)	10/08/2014 a 15/08/2014
ICSM 2008	Side (Turquia)	25/08/2008 a 29/08/2008
ICSM 2010	Antalya (Turquia)	25/04/2010 a 30/04/2010
ICSM 2012	Istambul (Turquia)	29/04/2012 a 04/05/2012
EUCAS 1993	Göttingen (Alemanha)	04/10/1993 a 09/10/1993
EUCAS 1995	Edinburgo (Escócia)	03/06/1995 a 06/06/1995
EUCAS 1997	Eindhoven (Holanda)	30/06/1997 a 03/07/1997
EUCAS 1999	Sitges (Espanha)	13/09/1999 a 17/09/1999
EUCAS 2001	Lyngby (Dinamarca)	26/08/2001 a 30/08/2001
EUCAS 2003	Sorrento (Itália)	14/09/2003 a 18/09/2003
EUCAS 2005	Vienna (áustria)	11/09/2005 a 15/09/2005
EUCAS 2007	Brussels (Bélgica)	16/09/2007 a 20/09/2007
EUCAS 2009	Dresden (Alemanha)	13/09/2009 a 17/09/2009
EUCAS 2011	The Hague (Holanda)	18/09/2011 a 23/09/2011
EUCAS 2013	Genova (Itália)	15/09/2013 a 19/09/2013
ISS 88	Nagoya (Japão)	28/08/1988 a 31/08/1988
ISS 89	Tsukuba (Japão)	14/11/1989 a 17/11/1989
ISS 90	Sendai (Japão)	06/11/1990 a 09/11/1990
ISS 91	Tokyo (Japão)	14/10/1991 a 17/10/1991
ISS 92	Kobe (Japão)	16/11/1992 a 19/11/1992
ISS 93	Hiroshima (Japão)	26/10/1993 a 29/10/1993
ISS 94	Kytakyushu (Japão)	08/11/1994 a 11/11/1994
ISS 95	Hamamatsu (Japão)	30/10/1995 a 02/11/1995
ISS 96	Sapporo (Japão)	21/10/1996 a 24/10/1996
ISS 97	Gifu (Japão)	27/10/1997 a 30/10/1997
ISS 98	Fukuoka (Japão)	16/11/1998 a 19/11/1998
ISS 99	Morioka (Japão)	17/10/1999 a 19/10/1999
ISS 2000	Tokyo (Japão)	14/10/2000 a 16/10/2000
ISS 2001	Kobe (Japão)	25/09/2001 a 27/09/2001
ISS 2002	Yokohama (Japão)	11/11/2002 a 13/11/2002
ISS 2003	Tsukuba (Japão)	27/10/2003 a 29/10/2003
ISS 2004	Niigata (Japão)	23/11/2004 a 25/11/2004

ISS 2005	Tsukuba (Japão)	24/10/2005 a 26/10/2005
ISS 2006	Nagoya (Japão)	30/10/2006 a 01/11/2006
ISS 2007	Tsukuba (Japão)	05/11/2007 a 07/11/2007
ISS 2008	Tsukuba (Japão)	27/10/2008 a 29/10/2008
ISS 2009	Tsukuba (Japão)	02/11/2009 a 04/11/2009
ISS 2010	Tsukuba (Japão)	01/11/2010 a 03/11/2010
ISS 2011	Tokyo (Japão)	24/10/2011 a 26/10/2011
ISS 2012	Tokyo (Japão)	03/12/2012 a 05/12/2012
ISIS-1	Washington, DC (EUA)	11/05/1992 a 13/05/1992
ISIS-2	Kanagawa (Japão)	14/05/1993 a 16/05/1993
ISIS-3	Aylesbury (Reino Unido)	17/05/1994 a 19/05/1994
ISIS-4	Washington, DC (EUA)	24/06/1995 a 25/06/1995
ISIS-5	Yamanashi (Japão)	14/05/1996 a 16/05/1996
ISIS-6	Florença (Itália)	17/09/1997 a 19/09/1997
ISIS-7	Washington, DC (EUA)	11/10/1998 a 13/10/1998
ISIS-8	Kyoto (Japão)	12/10/1999 a 14/10/1999
ISIS-9	Copenhague (Dinamarca)	01/10/2000 a 03/10/2000
ISIS-10	Santa Fe, NM (EUA)	14/03/2002 a 16/03/2002
ISIS-11	Tokyo (Japão)	17/11/2002 a 19/11/2002
ISIS-12	Karlsruhe (Alemanha)	21/09/2003 a 23/09/2003
ISIS-13	Florida (EUA)	07/10/2004 a 08/10/2004
ISIS-14	Ibaraki (Japão)	27/10/2005 a 28/10/2005
ISIS-15	Erlangen (Alemanha)	28/09/2006 a 29/09/2006
ISIS-16	Philadelphia (EUA)	29/08/2007 a 30/08/2007
ISIS-17	Ibaraki (Japão)	30/10/2008 a 31/10/2008
ISIS-18	Wellington (Nova Zelândia)	09/02/2010 a 11/02/2010
ISIS-19	Sestri Levante (Itália)	05/10/2010 a 06/10/2010
ISIS-20	Konjiam Resort (Coreia)	01/11/2011
PASREG 1997	Cambridge (Inglaterra)	07/07/1997 a 09/07/1997
PASREG 1999	Murioka (Japão)	19/10/1999 a 22/10/1999
PASREG 2001	Seattle (EUA)	11/07/2001 a 13/07/2001
PASREG 2003	Jena (Alemanha)	28/06/2003 a 02/07/2003

PASREG 2005	Tokyo (Japão)	21/10/2005 a 23/10/2005
PASREG 2007	Cambridge (Inglaterra)	13/09/2007 a 15/09/2007
PASREG 2010	Washington, D.C. (EUA)	29/07/2010 a 31/07/2010
PASREG 2012	Tainan (Taiwan)	06/12/2012 a 08/12/2012
M2S 1988	Interlaken (Suíça)	29/02/1988 a 04/03/1988
M2S 1989	Palo Alto (EUA)	23/07/1989 a 28/07/1989
M2S 1991	Kanazawa (Japão)	22/07/1991 a 26/07/1991
M2S 1994	Grenoble (França)	05/07/1994 a 09/07/1994
M2S 1997	Pequim (China)	28/02/1997 a 04/03/1997
M2S 2000	Houston (EUA)	20/02/2000 a 25/02/2000
M2S 2003	Rio de Janeiro (Brasil)	20/05/2003 a 25/05/2003
M2S 2006	Dresden (Alemanha)	09/07/2006 a 14/07/2006
M2S 2009	Tokyo (Japan)	07/09/2009 a 12/09/2009
M2S 2012	Washington, D.C. (EUA)	29/07/2012 a 03/08/2012

**Siglas:** ASC: Applied Superconductivity Conference; ICSM: International Conference on Superconductivity and Magnetism; EUCAS: European Conference on Applied Superconductivity; ISS: International Symposium on Superconductivity; ISIS: International Superconductivity Industry Summit; PASREG: Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO Large Grain Materials; M2S: Materials and Mechanisms of Superconductivity High Temperature.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com dados extraídos de <<http://www.ascinc.org>>, <<http://www.icsm2012.org>>, <<http://www.eucas2013.org>>, <<http://www.istec.or.jp>>, <<http://pasreg2012.org>> e <[www.m2s-2012.org](http://www.m2s-2012.org)>. Acesso em 12/11/2012.

Ainda na linha do levantamento de eventos e oportunidades de pesquisa na área de supercondutividade, foi realizada uma pesquisa na página do Conselho de Supercondutividade do IEEE (*The IEEE Council on Superconductivity, CSC*). Este conselho promove programas e atividades envolvidos com ciência e tecnologia aplicáveis a supercondutores. Na seção de anúncios, atualizada em 12 de novembro de 2012, foram identificados 24 eventos para o ano de 2012, o que incluía congressos, oportunidades de pós-doutorado, publicação de livros, entre outras atividades [53].

## 3.2. Avaliação SWOT

A avaliação SWOT, ou, em tradução para o português, análise FOFA, é atribuída ao pesquisador norte-americano Albert S. Humphrey. A metodologia foi desenvolvida a partir de um projeto de pesquisa conduzido na Universidade de Stanford, nas décadas de 1960 e 1970 [9, 10].

É citada pela literatura [10] como uma ferramenta útil para tomada de decisão em diferentes situações em empresas e negócios em geral. É reconhecida como aplicável a planejamento de negócios, planejamento estratégico, avaliação de competidores, marketing, desenvolvimento de produtos e realização de relatórios de pesquisa. É referenciada também como uma técnica adequada à avaliação de riscos no guia PMBOK (conjunto de conhecimentos em gerenciamento de projetos) [54].

Um exemplo de aplicação deste tipo de análise, para uma tecnologia, foi realizada em [121]. O autor discutiu a respeito das possibilidades de futuro da tecnologia dos trens de levitação magnéticos, apresentando suas forças, fraquezas, oportunidades e ameaças.

A Figura 3.5 e a Tabela 3.6 apresentam, respectivamente, um diagrama e o detalhamento de cada um dos quatro elementos envolvidos nesta análise. A Tabela 3.6, especificamente, já foi adaptada para uso da análise em uma tecnologia nova, no caso, supercondutividade de alta temperatura. Na sequência, os quatro aspectos pertinentes à avaliação são discutidos.



**Figura 3.5:** Diagrama da análise SWOT. **Fonte:** Elaborado pelo autor, com base nas referências [9, 10].

**Tabela 3.6.** Conceitos na avaliação da supercondutividade de alta temperatura.

<b>Elemento de Análise</b>	<b>Descrição do Elemento</b>	<b>Exemplo de Aplicação</b>	<b>Posicionamento no Tempo</b>
Forças e Fraquezas (Strengths and Weaknesses)	Associadas ao ambiente interno – fatores associados à própria tecnologia.	Por exemplo, fatores relacionados a aplicações, capacidade produtiva, custos, desempenho, entre outros.	Fatores associados ao presente, ou seja, os primeiros a serem percebidos.
Oportunidades e Ameaças (Opportunities and Threats)	Associadas ao ambiente externo – dependente de outros fatores que não somente a tecnologia.	Por exemplo, potenciais consumidores, setores, tecnologias rivais, política, sociedade, cultura, meio ambiente, entre outros.	Fatores associados ao futuro, ou seja, são percebidos após os primeiros.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base na referência [10].

### **3.2.1. Forças**

O primeiro elemento da análise, chamado “forças”, está associado ao ambiente interno, ou seja, para o caso em estudo, de avaliação de uma tecnologia, deve considerar os principais aspectos, que diferenciam a mesma de outras. Está ligado a vantagens internas da tecnologia, seja sob aspecto do aperfeiçoamento de aplicações já existentes, como também de novas aplicações.

Ao realizar o levantamento das forças, deve-se sempre observar um relacionamento entre as mesmas e as oportunidades/ameaças: com relação às oportunidades, o correto estudo das forças possibilita aproveitar ao máximo as oportunidades detectadas, já que elas estarão associadas à capacidade da tecnologia em

suprir as mesmas. Já no caso das ameaças, a correta avaliação permite “combater” as ameaças com maior eficácia.

O estudo das forças presentes na tecnologia da supercondutividade de alta temperatura trouxe os seguintes resultados:

- Reduzida resistência elétrica;
- Eliminação de parte das perdas, especificamente aquelas devidas ao efeito Joule;
- Possibilidade de obtenção de elevados campos magnéticos, úteis para sistemas de detecção;
- Capacidade de melhorar aplicações existentes (por exemplo, motores e transformadores) e possibilidade de desenvolvimento de novas (exemplo, armazenadores de energia tipo SMES);
- Melhor relação de potência por volume, ou seja, dispositivos menores;
- Redução de massa, ou seja, dispositivos mais leves;

### **3.2.2. Fraquezas**

Em analogia com o estudo de forças, está o estudo de fraquezas. Assim como no caso das forças, as fraquezas estão associadas ao ambiente interno, ou seja, para o caso em estudo, de avaliação de uma tecnologia, deve considerar os principais aspectos, que são negativos quando a tecnologia é comparada a realidade atual. São aspectos que podem comprometer a entrada da tecnologia no mercado, porém, sendo limitações da própria tecnologia e não do mercado.

Neste levantamento, quando relacionado com as oportunidades/ameaças, deve-se considerar ainda que as fraquezas possam dificultar o aproveitamento das oportunidades, se não forem corretamente interpretadas e combatidas (se possível), bem como tornar as ameaças mais complexas.

O estudo das fraquezas presentes na tecnologia da supercondutividade de alta temperatura trouxe os seguintes resultados:

- Elevado custo de fabricação;
- Tecnologia ainda muito limitada a laboratórios, precisando de um desenvolvimento e penetração maior no mercado;
- A escala de tempo associada à maturação da tecnologia ainda é de difícil previsão;

- A reputação da tecnologia ainda não está totalmente formada, o que pode dificultar seu acesso ao mercado.

### **3.2.3. Oportunidades**

A análise das oportunidades deve considerar fatores externos, ou seja, independentes da tecnologia, porém, que podem ser apropriados pela mesma quando corretamente aproximados das forças e afastado das fraquezas, avaliadas anteriormente. Estão mais associadas ao mercado, e aqueles interessados em atuar dentro do ramo da nova tecnologia (neste caso, supercondutividade de alta temperatura) devem estar sempre buscando associar as forças da mesma com as oportunidades, trazidas pelo mercado.

O estudo das oportunidades presentes na tecnologia da supercondutividade de alta temperatura, atualmente, trouxe os seguintes resultados:

- Já estão instalados protótipos, com relativo sucesso, de variadas aplicações;
- Materiais HTS encontram oportunidades em mercados variados, como por exemplo medicina, transportes e setor elétrico;
- Possibilidade de dispositivos com melhor eficiência, ou seja, mais econômicos para operação;
- Influência global, já que é uma tecnologia que está em constante avaliação em diferentes partes do mundo;
- Oportunidade de pesquisas avançadas, com possibilidade de patentes e dispositivos novos;
- Impacto ambiental positivo, por exemplo, no setor elétrico, onde pode colaborar com a redução na emissão de gases de efeito estufa;
- Custos de produção de energia estão em ascensão, o que justifica e fortalece tecnologias capazes de economizá-la;
- Histórico de tecnologias de desenvolvimento de novos materiais é favorável, e tipicamente estas apresentam grande impacto, como no caso dos semicondutores e mais recentemente da fibra ótica.

### **3.2.4. Ameaças**

O último dos quatro aspectos avaliados na análise, “ameaças”, assim como no caso das oportunidades, leva em conta fatores externos, ou seja, são aqueles que não são diretamente ligados a fraqueza da tecnologia, mas são limitações devidas a fatores de mercado e capazes de dificultar a sua chegada ao mercado. Para a definição de uma estratégia de comercialização, deve-se sempre procurar minimizar, com auxílio das forças, o possível impacto das ameaças.

O estudo das ameaças presentes na tecnologia da supercondutividade de alta temperatura, atualmente, trouxe os seguintes resultados:

- Quebra de alguns paradigmas da indústria e do seu modo de operação, o que pode limitar seu crescimento junto a setores mais conservadores;
- Necessidade de criogenia para operação, o que acarreta em mais um custo e também uma perda de energia;
- O atual estado da arte dos sistemas de criogenia ainda não é suficiente para todas as aplicações, havendo necessidade de maior desenvolvimento;
- A demanda de mercado por estas aplicações ainda é baixa, especialmente devido ao seu custo ainda elevado se comparado com tecnologia atual;
- O pessoal (equipe) para trabalhar na área ainda é uma mão de obra de custo mais elevado, e precisa de qualificações específicas;

### **3.2.5. Quadro Resumo**

A realização da análise SWOT, particularizada para o estudo da tecnologia de supercondutividade de alta temperatura, mostrou que os materiais deste tipo apresentam grandes forças e oportunidades, especialmente na consideração das possibilidades de melhorias técnicas e surgimento de novas aplicações. Entretanto, fraquezas e ameaças também estão presentes, associadas à necessidade de criogenia, aos ainda elevados custos de fabricação e a uma maior necessidade de desenvolvimento da tecnologia, que ainda não está totalmente madura.

Um resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 3.7. Os resultados obtidos, considerados promissores, motivam a realização de uma análise quantitativa, visando estimar os mercados futuros, custos e oportunidades, com base em um cenário do sistema elétrico brasileiro, foco do capítulo 4 desta tese.

**Tabela 3.7.** Análise SWOT.

<b>Forças</b>	<b>Fraquezas</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>→ Baixa resistência elétrica;</li><li>→ Mitigação de parte das perdas;</li><li>→ Obtenção de campos magnéticos elevados;</li><li>→ Novos dispositivos e melhoria de funcionalidades dos tradicionais;</li><li>→ Redução de Volume;</li><li>→ Redução de Massa;</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>→ Elevado custo de fabricação;</li><li>→ Tecnologia ainda muito limitada a laboratórios;</li><li>→ Maturação de difícil previsão;</li><li>→ A reputação não está totalmente formada;</li></ul>
<b>Oportunidades</b>	<b>Ameaças</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>→ Protótipos diversos;</li><li>→ Diversidade de mercados e aplicações;</li><li>→ Possibilidade de dispositivos com melhor eficiência;</li><li>→ Influência global;</li><li>→ Patentes e pesquisas avançadas;</li><li>→ Impacto ambiental positivo;</li><li>→ Alto custo da energia;</li><li>→ Histórico favorável para novas tecnologias de materiais;</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>→ Setores conservadores, resistentes a mudanças;</li><li>→ Necessidade de criogenia;</li><li>→ Tecnologia da criogenia;</li><li>→ Baixa demanda;</li><li>→ Equipe altamente especializada necessária;</li></ul>

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base na referência [10].

### **3.3. Avaliação Regional**

Partindo da Tabela 3.2, que mostra algumas das principais empresas atuando no ramo da supercondutividade, e realizando a separação das empresas por região, foi possível observar que três regiões (reconhecidamente Estados Unidos, Europa e Ásia) sediam mais de 90% das empresas que atualmente estão envolvidas no ramo. Além disso, dividindo-se também a Tabela 3.4, que mostra os centros de pesquisa, nestas três regiões também estão localizados 99% dos centros de pesquisa.

Desta forma, através de levantamento bibliográfico, serão destacadas algumas características do trabalho na área de materiais supercondutores de alta temperatura nestas regiões.

### 3.3.1. EUA

No caso dos Estados Unidos, por exemplo, a movimentação em torno dos materiais HTS já se fazia presente desde o ano de 1990, como mostra o relatório *High Temperature Superconductivity in Perspective* [55]. Este estudo, organizado pelo extinto OTA (*Office of Technology Assessment*) mostra um posicionamento otimista em relação aos materiais HTS, inclusive sob o ponto de vista de realização de investimentos. Os números, na ocasião, mostram uma política de investimentos bastante forte, quando comparada com outros países. Os dados são demonstrados na Tabela 3.8 e na Figura 3.6.

**Tabela 3.8.** Política de investimentos do ano de 1990.

<b>País</b>	<b>Investimento (em milhões de dólares)</b>
EUA	\$130.00
Japão	\$70.00
Alemanha	\$35.00
França	\$30.00
Inglaterra	\$20.00
Itália	\$15.00
Holanda	\$2.00

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base na referência [55].

Os números mostram os investimentos realizados na época, e que são uma das causas para a posição atual dos referidos países neste mercado. Paralelamente aos investimentos, o departamento de energia (DOE) norte-americano estabeleceu incentivos para formação de atividades em centros de pesquisa, de modo a realizar trabalhos em conjunto com empresas. Foram estabelecidos incentivos aos centros de pesquisa de *Argonne*, *Los Alamos* e *Oak Ridge*. O principal objetivo desta medida consistia em procurar acelerar o processo comercial da tecnologia, através do seu acesso ao mercado.



**Figura 3.6:** Política de investimentos. **Fonte:** Elaborado pelo autor, com base na Tabela 3.8.

Além dos esforços governamentais, também pode ser observada a movimentação entre as empresas. A política de investimentos do governo norte americano possibilitou o fortalecimento dos três elementos da primeira análise qualitativa aqui realizada: mercado, indústria e equipe, de modo que hoje, há tecnologia disponível para fabricação de fios, que são o insumo básico para as aplicações do setor elétrico. Não há perspectivas de falta destes insumos, o que é importante no caso de desenvolvimento de aplicações comerciais. E a política de investimentos assegura também verba para pesquisa, uma medida considerada importante no caso de tecnologias que ainda dependem de um “percurso” até atingir a maturidade comercial [15].

### 3.3.2. Europa

Na Europa, está estabelecido o *Consortium of European Companies Determined to Use Superconductivity* “CONNECTUS” [52], que congrega grandes empresas como a ALSTOM e a SIEMENS. O principal objetivo do consórcio é fortalecer as bases para viabilizar aplicações comerciais de supercondutividade. Os envolvidos vêm a supercondutividade como uma tecnologia capaz de trazer uma série de benefícios à economia e à sociedade, chegando a considerá-la como chave para sucesso nos próximos anos.

De acordo com o grupo CONECTUS, estão estabelecidas uma série de empresas de pequeno e médio porte, capazes de manter uma posição forte no ramo. Estas empresas são fruto de políticas de pesquisa e desenvolvimento das décadas de 70, 80 e 90, além dos investimentos realizados em supercondutividade de baixa temperatura. Os números mostrados anteriormente atribuem cerca de 30% das empresas envolvidas como sediadas na Europa, o que realmente é um número expressivo.

Estes mesmos fundos de pesquisa garantiram também competitividade no ramo dos materiais. Entretanto, nos últimos anos, o nível de investimentos vem diminuindo, e a maior parte das novas descobertas tem ficado restrita a Estados Unidos e Ásia. O grupo das empresas destaca a importância de estabelecer mais investimentos para garantir a competitividade contínua da Europa frente a outras regiões do mundo.

Outro fator, destacado pelo consórcio, é a importância da pesquisa não somente dos materiais e aplicações de supercondutores, mas também a continuidade do desenvolvimento das técnicas de criogenia. Estas também são fundamentais na viabilização desta tecnologia.

Além das empresas ligadas ao grupo CONECTUS, tanto grandes e tradicionais empresas, como é o caso de Siemens, Rolls Royce e Philips, já mantém pesquisa e desenvolvimento na área. No caso da Siemens, em 1999, foi iniciado o projeto chamado “HTS I”, onde um motor com enrolamentos feitos com cabos HTS, e potência nominal de 400 kW, foi operado por cerca de dois anos e meio [56]. Esse projeto foi seguido pelo “HTS II” e “HTS III”.

### **3.3.3. Ásia**

Os números apresentados na seção 3.4.1 mostram que a participação de países asiáticos é significativa na pesquisa e desenvolvimento na área. E o Japão é um dos grandes responsáveis por esta participação.

Alguns dos principais programas, das décadas de 70 e 80, são apresentados a seguir, na Tabela 3.9.

A pesquisa nesta área no Japão tem seu início na década de 60 [57], e por cerca de dez anos, os pesquisadores japoneses estiveram buscando acompanhar a tecnologia já desenvolvida, especialmente nos Estados Unidos. Em cerca de uma década de trabalho, o nível tecnológico da pesquisa no Japão atingiu o patamar norte-americano.

**Tabela 3.9.** Projetos Japoneses.

<b>Projeto</b>	<b>Agência de suporte e laboratório</b>	<b>Duração</b>
MHD Power generation	MITI, ETL, empresas	1966 – 1975
High Energy Physics	MoE, KEK, empresas	1971 *
Supermagnets for Fusion Research	STA, JAERI	1970 *
Maglev Train	MOT, JNR	1970 *
Electromagnetic Ship Propulsion	Ad-hoc group, Japan Foundation for Shipbuilding Advancement	1970 *
Basic technology for superconductivity and refrigeration	STA, NRIM	1982 – 1986
Superconducting magnetic energy storage (SMES)	MITI	1986 *
Superconductive generation equipment and materials (Super GM)	MIT I (NEDO)	1988 - 1995
Superconducting quantum electronics	MoE unversities	1979 – 1981
Josephson Junction Devices	MIT I, ETL, NTT, empresas	1982 – 1989
New superconducting materials	MoE universities	1984 – 1986

**Siglas:** ETL: Electrotechnical Laboratory; JAERI: Japan Atomic Energy Research Institute; JJ: Josephson Junction; JNR: Japan National Railroad (now broken up into 7 regional companies); KEK: National High-Energy Physics Laboratory; MHD: Magnetohydrodynamics; MITI: Ministry of International Trade and Industry; MOE: Ministry of Education; MOT: Ministry of Transportation; MW: Megawatt; NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization; NRIM: National Research Institute for Metals; NTT: Nippon Telephone and Telegraph; STA: Science and Technology Agency.

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base na referência [55]. **Nota:** Os projetos com duração não especificada apresentam informação apenas sobre o ano de início e estão marcados com um “\*”.

Na década de 1970, o governo japonês investiu em diversos projetos, junto a universidades e centros de pesquisa, o que acelerou a pesquisa e o desenvolvimento, inclusive, ultrapassando a capacidade dos Estados Unidos em algumas áreas [55].

Estes programas foram caracterizados pela sua longa duração, o que busca assegurar a continuidade nas pesquisas. São também focados em laboratórios do governo e formação de pessoal, apesar de captarem recursos não apenas junto ao estado como também da iniciativa privada.

A proximidade entre as empresas e o governo, nos projetos japoneses, é um meio de fortalecer e interligar os três aspectos da análise qualitativa realizada na seção 3.1: mercado, indústria e equipe. Desta forma, estes estudos estão contribuindo para levar o Japão a um nível de pesquisa e desenvolvimento elevado na área [55].

Atualmente, os programas japoneses visam integrar a tecnologia HTS nos programas LTS mais antigos, de modo a gradativamente promover a substituição dos respectivos materiais.

### **3.3.4. Brasil**

No Brasil, não foram definidas ainda pelo governo iniciativas específicas para o desenvolvimento de tal tecnologia. Apesar da existência de grupos de pesquisa na área, como é o caso do Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP), situado na Universidade Federal do Rio de Janeiro [58], estes ainda estão baseados em iniciativas isoladas. Uma primeira medida, a ser tomada pelo governo, é uma busca pela integração destes laboratórios, de forma a promover um fortalecimento.

O incentivo ao estabelecimento de conferências regionais em intervalos de tempo regulares, como é o caso da Escola Brasileira de Supercondutividade, também é importante. Este seria um fortalecedor do aspecto “equipe” da análise qualitativa da seção 3.1.

Tomando-se o caso dos Estados Unidos, já são 18 anos de defasagem em relação aos programas de pesquisa desenvolvidos pelo governo, através de suas agências. A Tabela 3.10 mostra as principais instituições brasileiras atualmente envolvidas na pesquisa em supercondutividade.

Os estudos de caso apresentados para outras regiões podem ser empregados como referências e adaptados ao caso e realidade brasileiros. O programa dos EUA, por exemplo, foi baseado em investimentos financeiros mais elevados, quando comparados

a outros países. Entretanto, o exemplo japonês mostrou a importância da continuidade dos projetos.

**Tabela 3.10.** Instituições brasileiras ligadas à pesquisa em supercondutividade.

<b>Sigla</b>	<b>Instituição</b>
CBPF	Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas
CEPEL	Centro de Pesquisas da Eletrobrás
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
PUC/RJ	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
UNB	Universidade Nacional de Brasília
Unesp/Bauru	Universidade Estadual Paulista/Campus de Bauru
Unesp/Ilha Solteira	Universidade Estadual Paulista/Campus de Ilha Solteira
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
USP/São Paulo	Universidade de São Paulo/Campus São Paulo
USP/Lorena	Universidade de São Paulo/Campus Lorena (antiga FAENQUIL)

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base em páginas internet de diversas instituições.

Ainda há outros fatores, como por exemplo, a não existência da possibilidade de suprir uma eventual demanda por fios supercondutores, já que não há empresas trabalhando nesta área no Brasil. Deste modo, a pesquisa direcionada a aplicações deve ser realizada levando-se em conta uma eventual dependência de fornecedores estrangeiros para os insumos básicos, como fios e cabos. Isto mostra fragilidade no aspecto “indústria”, da análise qualitativa da seção 3.1.

Há uma real necessidade de posicionamento nesta área, pois como vem sendo apresentado neste trabalho, este assunto é de interesse global, e há um consenso entre

pesquisadores do mundo sobre a importância da tecnologia e os benefícios que ela pode agregar nos próximos anos, especialmente para as próximas gerações.

Tomando o sistema de transmissão brasileiro como exemplo, [59], as perdas na transmissão vêm sofrendo aumentos sucessivos, saindo de 11% e atingindo 15% do total. Um sistema de transmissão supercondutor poderia reverter parte desta energia, e possibilitar o aproveitamento de parte desta. Um exemplo é o sistema de testes implementado pela AMSC, em Nova Iorque. O sistema é capaz de transmitir 574 MW de potência, a 138 kV de tensão nominal. De acordo com a AMSC, o sistema é capaz de carregar até cinco vezes a energia transmitida por um sistema de mesmas dimensões, feito com condutores de cobre. Ao mesmo tempo, deve-se lembrar que este tipo de sistema, com material HTS, não é aplicável a todos os casos, não sendo possível reverter todas as perdas deste tipo. Uma análise mais detalhada deveria ser realizada, caso este número fosse avaliado.

Esta conseqüente diminuição de perdas levaria a uma expansão da oferta de energia disponível para consumo, mas sem a necessidade de instalação de novos empreendimentos, e seus conseqüentes impactos ambientais.

### **3.4. Conclusões Parciais**

O foco deste capítulo foi a realização de uma análise qualitativa a respeito das aplicações de supercondutividade de alta temperatura no sistema elétrico. Isto significa que a análise deste capítulo leva em conta os dados observados na literatura acerca do assunto. Entre as referências consultadas, destaque para a *Superconductor Week*, uma publicação que trata de comercialização, mercados, produtos, desenvolvimento de negócios e pesquisa nas áreas de supercondutividade e criogenia.

Para realização desta avaliação, foram escolhidos dois métodos. Primeiramente, o método dos 7 domínios, proposto por Mullins, cuja aplicação principal, segundo o autor, é a avaliação de uma oportunidade de negócio, foi adaptado para aplicação em uma nova tecnologia, considerada como tendo potencial para várias oportunidades de negócio. Esta adaptação resultou em um método baseado em três domínios, a saber: mercado, indústria e equipe. Os resultados obtidos através deste método foram positivos, indicando como boas as perspectivas de aplicação de dispositivos baseados em supercondutores de alta temperatura no sistema elétrico.

O segundo método empregado consistiu na realização de uma análise SWOT, cuja sigla representa Forças (*Strengths*), Fraquezas (*Weaknesses*), Oportunidades (*Opportunities*) e Ameaças (*Threats*). A realização desta análise mostrou a supercondutividade de alta temperatura como uma tecnologia de bastante potencial futuro, com grandes forças e oportunidades, especialmente na consideração das possibilidades de melhorias técnicas e surgimento de novas aplicações. Entretanto, fraquezas e ameaças também estão presentes, associadas à necessidade de criogenia, aos ainda elevados custos de fabricação e a uma maior necessidade de desenvolvimento da tecnologia, que ainda não está totalmente madura. Os resultados obtidos de ambas as análises, positivos, motivam a realização de uma avaliação quantitativa, foco do capítulo 4 desta tese.

Ainda neste capítulo, foi realizada uma avaliação regional, visando observar o desenvolvimento da tecnologia em diferentes regiões. Esta análise provou a importância de uma política de investimentos continuativa, visando fortalecer o desenvolvimento tecnológico na área.

# CAPÍTULO 4

---

## Análise Quantitativa

---

**E**nquanto no capítulo anterior foi apresentado um modelo de análise qualitativo, baseado no método dos sete domínios e na análise SWOT, este capítulo tem por objetivo realizar uma análise quantitativa do caso da aplicação de dispositivos baseados em supercondutores de alta temperatura no sistema elétrico brasileiro.

Embora muitos estudos tenham definido a tecnologia como promissora, como por exemplo, [14, 60, 61], o levantamento bibliográfico revelou poucas avaliações [14, 62, 63] relacionadas a números que estimem o crescimento, o tempo e as condições necessários para estabelecimento da tecnologia. Em especial, o estudo realizado em [14] apresentou um método para estimar o impacto futuro para cenários onde dispositivos supercondutores são considerados viáveis, especialmente do ponto de vista econômico.

O foco principal do trabalho em [14] foi apresentar um modelo de simulação, implantado em planilha eletrônica, no caso, Microsoft Excel. Os detalhes do funcionamento são discutidos e ilustrados baseados em um caso numérico apresentado pelos autores, e que utiliza dados oriundos do sistema elétrico dos Estados Unidos. Os autores realizaram ainda uma análise onde variam um dos parâmetros e estudam brevemente a sensibilidade dos resultados a esta variação.

Este estudo será apresentado, revisado, discutido e adaptado ao caso brasileiro, com algumas melhorias quando julgado necessário. A simulação do estudo original foi realizada no final da década de 90, compreendendo um período de 20 anos, entre 2000 e 2020. Entende-se que o momento atual é propício a uma análise, visando o estudo do caso brasileiro, que estará situado entre os anos de 2015 e 2040.

É importante observar que, na aplicação deste método, admite-se que a tecnologia é viável e se tornará comercialmente disponível. Uma série de premissas é definida pelo analista, e reflete também suas percepções pessoais. A planilha é uma ferramenta que pode ser aplicada a diferentes cenários, e naturalmente algumas das suposições podem vir a não se tornar realidade. Isto acrescenta incerteza aos resultados finais. Porém, não invalida o uso desta ferramenta, inclusive sugerindo que ela possa ser usada de modo contínuo, ou seja, atualizada em períodos de tempo definidos, de acordo com as variações das principais suposições (cenário de entrada),

Neste capítulo, os principais objetivos são:

- Apresentar o método de análise, seu princípio de funcionamento e sua implementação no Excel.
- Discutir possíveis melhorias no modelo e na sua parametrização.
- Apresentar os dados de simulação a serem empregados, para o caso Brasil, realizando e fundamentando estimativas onde necessárias.
- Discutir os resultados.

## **4.1. Detalhamento do Modelo**

A principal vantagem dos materiais em estado supercondutor, já apresentada, é a baixa resistência elétrica (próxima de zero) observada quando o material é resfriado abaixo da temperatura de transição. Deste modo, admitindo-se o uso de um dispositivo supercondutor, em detrimento do uso de um construído com tecnologia convencional, pode-se afirmar que haverá um custo econômico evitado, devido à eliminação de parte das perdas, que será observado durante todo o ciclo de vida do equipamento.

Partindo deste princípio, a decisão por utilizar ou não um dispositivo supercondutor deve levar em consideração não somente as vantagens técnicas, mas também todos os aspectos econômicos envolvidos, desde o custo inicial, até o custo durante todo o ciclo de vida (custo de operação).

Desta maneira, o princípio de operação deste modelo segue quatro passos básicos:

- 1) Calcular as perdas no sistema elétrico atual, instalado, que definem as oportunidades de mercado para dispositivos de tecnologia supercondutora. Neste cálculo, deve-se distribuir as perdas: ou seja, definir o quantitativo das mesmas em cada estágio: quanto se perde na geração, na transformação e na transmissão.
- 2) A seguir, observar no total das perdas, aquelas que realmente podem deixar de existir pelo uso de dispositivos supercondutores. O uso do material supercondutor não elimina todas as perdas, e ainda carrega a necessidade de gastar energia no sistema de resfriamento. Isto deve ser contabilizado no cálculo.
- 3) Estimar os custos econômicos evitados a partir da energia não dissipada sob forma de calor, e compará-los aos custos dos dispositivos baseados em materiais supercondutores. A comparação citada deve considerar todo o ciclo de vida do equipamento em questão: por exemplo, considerando-se a vida média de um motor em 20 anos, a comparação seria a respeito da economia propiciada por um motor supercondutor ao longo destes 20 anos.
- 4) Baseado na penetração de mercado estimada, comparar, como definido no passo “3”, sucessivamente, para cada equipamento definido no escopo.

A definição acerca do escopo do modelo informa quais aplicações de supercondutividade são consideradas na análise. O escopo do modelo norte-americano, na ocasião da publicação, foi limitado pelos autores a quatro tipos de dispositivos, a saber:

- Motores com potência acima de 370 kW.
- Geradores acima de 100 MVA.
- Transformadores acima de 30 MVA.
- Cabos utilizados em tensão de transmissão.

Os autores do trabalho original, dos EUA, utilizaram como critério, para definir estas quatro categorias de dispositivos, a experiência pessoal e o que qualificaram como “escolhas de engenharia”.

No estudo do caso brasileiro, aqui desenvolvido, optou-se por utilizar duas referências: primeiramente, os resultados de uma pesquisa de mercado conduzida pela empresa “Bento Strategy” [64, 65, 66], que tem sido realizada anualmente desde 2008, com envolvimento de representantes do meio acadêmico e da indústria. Os participantes são convidados a responder uma série de perguntas, sobre a tecnologia. A expectativa de aplicação de alguns dispositivos e os resultados são condensados na forma de um relatório, que é enviado aos participantes. A segunda referência são os dados (estimativas) realizadas pelos especialistas do grupo CONECTUS [52]. Trata-se de perspectivas de aplicação de curto prazo (até 2016) para alguns dispositivos.

Com relação a primeira referência consultada, de acordo com a empresa organizadora (Bento Strategy), o principal objetivo é obter informação sobre as aplicações de HTS com maior potencial, classificá-las em prioridade e escala de tempo, considerando-se também o campo industrial.

Uma análise dos resultados destas pesquisas, conduzidas de 2008 a 2010 [64, 65, 66], revela que há real interesse em torno de tecnologias novas no mercado, caso dos limitadores de corrente supercondutores. Porém, a natureza do modelo de simulação adotado na referência [14] envolve análise de perdas comparada entre dispositivos já existentes, convencionais, e dispositivos baseados em material HTS, como, por exemplo, a comparação de um gerador construído com tecnologia convencional e um com tecnologia HTS. Este modelo não é adequado para ser aplicado a novos dispositivos. Entende-se que para tal, deve ser investigada uma metodologia capaz de atribuir valor às vantagens técnicas inerentes aos dispositivos novos, o que não se inclui no escopo deste trabalho.

Com relação à segunda referência, baseada em estimativas dos especialistas do grupo CONECTUS para novos mercados, as aplicações consideradas mais promissoras foram organizadas e estão apresentadas na Tabela 4.1.

Assim como nas pesquisas realizadas pela Bento Strategy, os dados estimados pelos especialistas do grupo CONECTUS apontam para aplicações do sistema elétrico. O limitador de corrente é um destaque positivo de ambas as avaliações, porém, conforme comentado anteriormente, não pode ser avaliado pela metodologia deste estudo quantitativo.

Deste modo, o escopo de aplicações do trabalho original foi mantido, em motores, geradores, transformadores e cabos. A potência e tensão aplicáveis a cada

dispositivo serão analisados posteriormente, quando da análise dos dados levantados para o sistema elétrico brasileiro.

**Tabela 4.1.** Estimativas realizadas pelo grupo CONECTUS.

Aplicação	2012	2013	2014	2015	2016
Imãs para novas aplicações médicas	●●	●●	●●●	●●●	●●●
Limitadores de Corrente	●	●●	●●	●●	●●●
Cabos	●	●	●	●	●●
Máquinas Elétricas	●	●	●	●	●●
Mancais Magnéticos e Levitação	●	●	●	●	●●
Magnetocardiografia	●	●	●●	●●	●●
Circuitos Digitais	●	●	●●	●●	●●
Outros Dispositivos Eletrônicos e Circuitos	●	●	●●	●●	●●

Legenda:

- → Primeiras unidades, relativas à pesquisa, desenvolvimento, testes de campo e protótipos.
- → Mercado emergente
- → Mercado estabelecido

**Fonte:** Elaborado pelo autor, adaptado dos dados apresentados em [52].

Convém observar, novamente, que há uma lacuna neste modelo em relação a estudos econômicos aplicados a dispositivos novos. Os resultados obtidos nos relatórios das pesquisas trouxeram também a informação sobre a importância de conduzir mais estudos a respeito de novas aplicações, fora do setor elétrico, como, por exemplo, na área de transportes, eletrônica e medicina.

Após a realização dos cálculos de simulação, baseados nas informações conhecidas e nos dados conhecidos no presente e extrapolados para o futuro, os seguintes resultados são esperados:

- Custo do fio HTS.
- Estimativa da quantidade de fio necessária para suprir a demanda estimada.
- Custo da criogenia.
- Mercado estimado.
- Energia “economizada”.

A análise conduzida desta maneira permite avaliar o desempenho do mercado em função do custo do material e da criogenia, apontados pelas referências consultadas [14, 15, 52, 64, 65, 66] como os maiores impeditivos do uso de dispositivos supercondutores, além do próprio desenvolvimento técnico dos mesmos.

Outra possibilidade para este modelo é empregá-lo para uma análise de redução de emissões de gases de efeito estufa [14], considerando-se que a energia que é perdida atualmente no sistema elétrico estaria disponível para consumo, e, conseqüentemente, dispensando a instalação de novos empreendimentos de geração. Porém, não está no escopo deste trabalho realizar uma análise ambiental, que pode ser considerada como um trabalho futuro.

## **4.2. Parametrização do Modelo**

O caso estudado pelos autores do trabalho original [14] está compreendido no intervalo entre os anos 2000 e 2020, aplicado ao sistema elétrico dos Estados Unidos. Entende-se que o momento atual, situado próximo ao centro de período analisado pelos autores, é uma oportunidade de avaliar as premissas e condições de simulação adotadas, comparando-se o cenário que foi desenhado em relação à realidade atual.

Neste trabalho, com o objetivo de realizar um estudo para o caso do Brasil, será adotado o período de 2015 a 2040, tendo como referência os planos decenal e nacional de energia da EPE [67, 68]. Estes fornecerão informações sobre o crescimento do consumo energético.

Uma diferença em relação ao estudo original foi a ampliação do intervalo de tempo, de 20 para 25 anos. Entende-se que, por tratar-se de uma tecnologia ainda em fase de desenvolvimento, é interessante fazer uma análise em intervalo de tempo ligeiramente acima do original. Ao mesmo tempo, períodos de tempo extremamente maiores podem levar a resultados com elevado nível de incerteza.

De maneira geral, o modelo supõe que o consumo de energia elétrica aumentará ao longo destes 25 anos, e que esta energia será produzida em novos geradores, elevada/reduzida através de novos transformadores, transmitida parcialmente em linhas novas e consumida parcialmente por novos motores. Parte destes dispositivos será baseada em material supercondutor, e a energia gerada/consumida/transmitida por eles será uma porcentagem do aumento do consumo de energia ao longo dos anos. Esta porcentagem é a chamada penetração de mercado do material HTS. Considera-se

também que uma parte dos dispositivos novos, substitutos de dispositivos atualmente instalados no sistema, poderá ser HTS.

Baseado nestas informações sobre o funcionamento do modelo, algumas etapas foram conduzidas de modo a levantar e fundamentar as premissas de simulação para o caso brasileiro:

- Primeiramente, o crescimento percentual do consumo de energia elétrica no Brasil no período de 2015 a 2040 foi consultado, no Plano Nacional de Energia [67].
- Foram realizadas estimativas de taxas de substituição para cada dispositivo (motor, gerador, cabo e transformador), baseadas em acompanhamento de mercado e comparação com as estimativas realizadas no caso norte-americano [14]. A energia economizada neste ponto foi contabilizada no cálculo final.
- Para cada um dos dispositivos, foi realizada também uma estimativa de economia de energia em relação à tecnologia atual, ou seja, quanto um motor HTS economiza do ponto de vista energético em relação a um motor convencional, por exemplo.
- O modelo trabalha com soluções de melhor custo, de modo que o capital aplicado inicialmente deverá ser retornado ao longo do tempo, realizando-se a análise de custo econômico evitado ao longo de toda vida útil do equipamento. Desta maneira, devem ser estimados ao longo do tempo os custos dos fios HTS e também da criogenia, bem como da energia economizada.
- A taxa de penetração da tecnologia em cada dispositivo no mercado será diretamente influenciada pelos custos dos fios HTS e da criogenia, e, a partir desta informação, modelada com o uso de “Curvas S”. A taxa de substituição, citada acima, também deve ser acrescida aqui.
- A energia economizada total foi obtida multiplicando-se a energia relativa a substituições e aquela devida ao crescimento de consumo (novas instalações) pelo fator de penetração de mercado.
- A contribuição de cada um dos dispositivos foi somada e multiplicada pelo valor atribuído ao kWh, de modo a estimar o custo econômico evitado.

### 4.2.1. Estimativas do Setor Elétrico Brasileiro

As estimativas apresentadas pelo caso exemplo do estudo para o sistema americano [14] foram baseadas no “Annual Energy Outlook 1998”, publicado pela EIA, 1998 [69]. A partir das informações deste relatório, os autores utilizaram uma taxa de crescimento anual de 1,4%. A partir deste número, o mercado potencial para dispositivos elétricos, supercondutores ou convencionais foi estimado, de acordo com o modelo e a parametrização levantada no estudo.

Para o caso brasileiro, esta informação foi retirada de duas fontes: do plano decenal de energia, cuja taxa de crescimento, de 5,1%, foi utilizada até 2020 e deste ponto em diante, do plano nacional de energia 2030, da EPE, no capítulo de projeções [67, 68]. O PNE é definido em relação a quatro cenários, ficando o crescimento anual até 2030 situado entre 3,5 e 5,1%. Como referência para este trabalho, optou-se por um valor intermediário, de 4,3%. Esta taxa de crescimento, bastante elevada se comparada àquela apresentada no caso norte-americano, mostra que há expectativa por desenvolvimento elevado no país, inclusive em infra-estrutura, setor mais consolidado no caso norte-americano. O plano nacional de energia cita ainda os seguintes aspectos como sendo de influência para esta taxa:

- Grau de modernização da atividade agropecuária no país.
- Participação dos grandes consumidores industriais de energia elétrica no valor adicionado total da indústria.
- Aumento da participação do setor de serviços no PIB.
- Evolução do consumo per capita de eletricidade no setor residencial.
- Difusão de alternativas eficientes de uso da eletricidade.

O passo seguinte da análise do setor elétrico consiste em realizar uma estimativa de perdas na rede convencional (não-supercondutora). Esta análise tem por objetivo identificar o quantitativo de perdas e identificar a parcela que efetivamente pode ser mitigada pelo uso de material supercondutor (perdas por efeito Joule). Como citado anteriormente, mitigar perdas é fator decisivo no uso de dispositivos supercondutores. A análise do caso norte-americano foi também baseada no “Annual Energy Outlook 1998”, publicado pela EIA, 1998 [69].

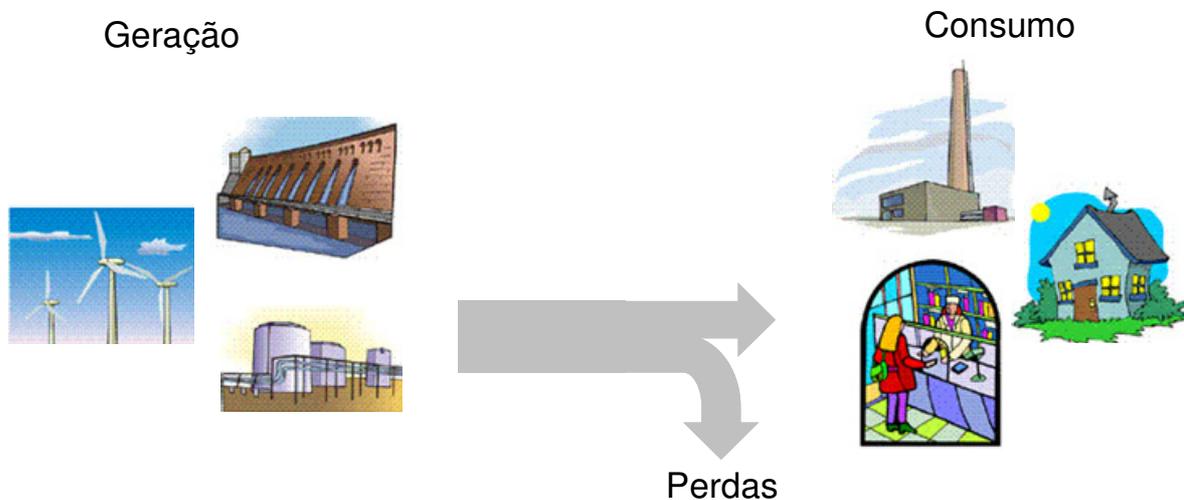
Para o caso brasileiro, o documento de referência para obtenção dos dados é o balanço energético nacional (BEN). A versão do balanço mais recente, disponível, é a

de 2010, que tem 2009 como ano-base. Como a análise proposta neste trabalho inicia-se em 2015, estes dados serão extrapolados utilizando-se a taxa de 5,1%, obtida no PDE. A próxima seção mostra como foi realizada a análise.

## 4.2.2. Levantamento de Perdas

Para aplicação no sistema elétrico, o principal diferencial dos dispositivos supercondutores é a sua propriedade de apresentar resistência elétrica próxima de zero. Embora alguns dispositivos novos utilizem-se de outras propriedades, como por exemplo, no caso dos limitadores de corrente, que utilizam-se da característica do material supercondutor de abandonar o estado supercondutor quando ultrapassado o valor de seu campo crítico ou densidade de corrente crítica, estas não estão contempladas neste estudo.

Desta maneira, o diferencial técnico e econômico do uso de dispositivos supercondutores está associado à mitigação de perdas técnicas no sistema elétrico. Faz-se necessário realizar um estudo ao longo do sistema, de modo a estimar quanto de perdas é devido ao mesmo, conforme ilustra a Figura 4.1.



**Figura 4.1:** Representação de perdas no sistema elétrico. **Fonte:** Elaborado pelo autor, adaptado da biblioteca de imagens do Microsoft Powerpoint [120].

Alguns trabalhos e metodologias foram consultados para realizar este levantamento, destacando-se [70, 71, 72, 73, 74]. No estudo do caso norte-americano [14], foram utilizados metodologia e resultados obtidos em [70].

A metodologia escolhida para realizar a avaliação foi baseada em [70]. Entretanto, foram inseridas algumas mudanças no método original, que serão

apresentadas e discutidas, tendo sido os dados obtidos a partir de fontes referentes ao sistema elétrico brasileiro [67, 74, 75, 76]. O método consiste em utilizar uma planilha que percorre os principais segmentos de um sistema elétrico: geração, transformação e transmissão. O segmento de distribuição não foi incluído no estudo citado, e também não será abordado aqui.

A metodologia, apresentada em [70] iniciou com um levantamento de perdas no sistema norte-americano. De modo análogo, aqui o trabalho é iniciado através de uma identificação do total de perdas no sistema nacional. Dados consolidados, de geração e consumo, foram obtidos e/ou calculados através de informações do balanço energético nacional [75], na versão publicada em 2010, e estão sumarizados na Tabela 4.2. Os dados de 2015 foram extrapolados a partir dos dados de 2010, utilizando-se uma taxa de crescimento de 5,1% ao ano. Esta taxa foi obtida como uma média, advinda dos valores de crescimento previstos nos diferentes cenários do PNE 2030 [67].

Apesar do uso de uma mesma taxa para todas as fontes, é importante observar que os números mais importantes obtidos aqui dizem respeito à totalização, ou seja, oferta interna total, perdas no sistema, consumo final e total de geração. Para obter dados consistentes para alguma fonte em especial, ou algum setor de consumo de eletricidade, recomenda-se buscar dados mais específicos.

Os dados de “total geração” dizem respeito à soma das diferentes fontes. Entretanto, a oferta interna total também deve ser acrescida da energia importada. A geração obtida a partir de cada fonte é consolidada através da soma de centrais elétricas de serviço público, juntamente com centrais elétricas autoprodutoras. Esta é a energia que está disponibilizada no sistema elétrico.

De maneira análoga, os dados de consumo são somados, para obtenção do consumo de eletricidade total. A diferença entre a energia que entra no sistema elétrico, e a energia consumida, é computada como perdas. As perdas, em 2010, ficaram em torno de 80 TWh, sendo posteriormente extrapoladas para o ano de 2015, utilizando-se a mesma taxa, de 5,1% ao ano. Esta aproximação admite que as perdas permaneceram percentualmente congeladas ao longo do tempo.

Uma forma de estimar o custo financeiro destas perdas é associá-las às tarifas médias de energia elétrica, obtidas do site da Aneel [77]. Os dados empregados são de abril de 2011 e estão apresentados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.2.** Detalhamento dos dados obtidos do Balanço Energético Nacional, 2010.

<b>Geração</b>	<b>2010 (GWh)</b>	<b>2015 (GWh)*</b>
<b>Energia Elétrica</b>	-	-
Hidráulica	390.988	501.391
Gás Natural	13.332	17.096
Eólica	1.446	1.854
Carvão Vapor	5.429	6.961
Lenha	1.124	1.441
Óleo Diesel	7.373	9.454
Óleo Combustível	5.351	6.861
Urânio Contido no UO2	12.957	16.615
Bagaço de Cana	14.058	18.027
Lixívia	6.669	8.552
Gás de Coqueria	1.384	1.774
Outros	6.048	7.755
<b>Total Geração</b>	<b>466.158</b>	<b>597.787</b>
<b>Importação</b>	<b>40.000</b>	<b>51.294</b>
<b>Oferta Interna Total</b>	<b>506.158</b>	<b>649.082</b>
<b>Consumo de eletricidade por setor</b>	-	-
Energético	18.756	24.052
Residencial	101.779	130.518
Comercial	64.329	82.494
Público	36.693	47.054
Agropecuário	16.600	21.287
Transportes	1.591	2.040
Industrial	186.280	238.880
<b>Consumo Final</b>	<b>426.029</b>	<b>546.327</b>
<b>Perdas no Sistema</b>	<b>80.129</b>	<b>102.755</b>

**Fonte:** Elaborado pelo autor, adaptado dos dados apresentados no Balanço Energético Nacional 2010, no Plano Nacional de Energia 2030 e no Plano Decenal de Energia 2020 [67, 68, 75]. **\*Nota:** Dados extrapolados, com taxa de 5,1% ao ano, a partir das informações consolidadas para 2010.

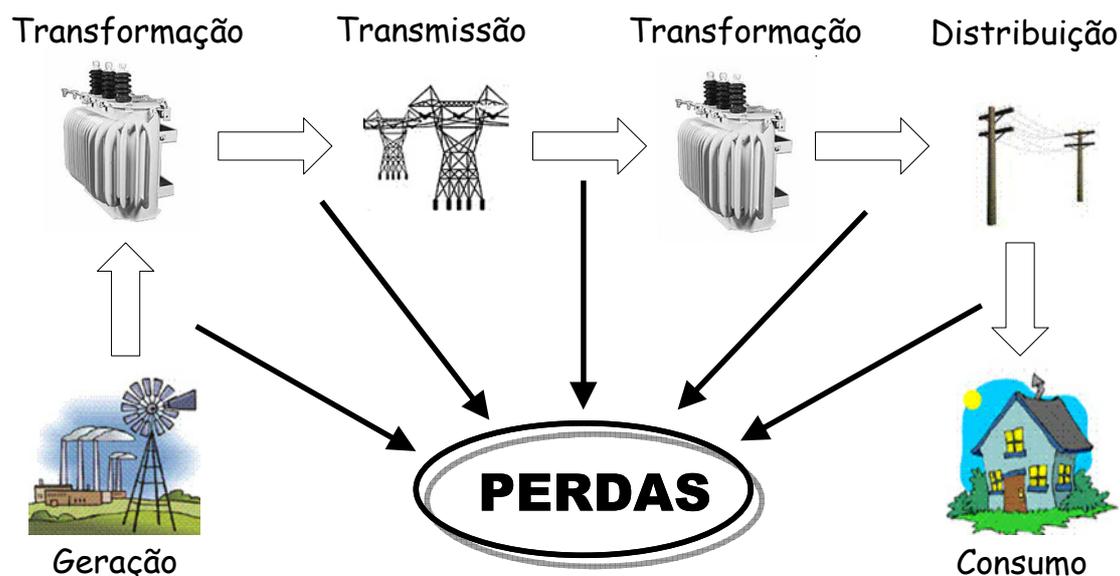
**Tabela 4.3.** Tarifas de energia elétrica, no período de abril de 2011.

<b>Classe de Consumo</b>	<b>Consumo (MWh)</b>	<b>Receita (R\$)</b>	<b>Número de consumidores</b>	<b>Tarifa média (R\$/MWh)</b>
Residencial	9.276.139	2.863.010.056,65	58.220.154	308,64
Industrial	6.446.334	1.426.097.953,73	557.120	236,61
Comercial, Serviços e outras	6.054.848	1.743.632.451,46	4.949.916	289,87
Rural	1.187.572	247.664.864,71	3.807.010	208,55
Poder Público	1.149.930	360.118.917,58	512.484	313,17
Iluminação Pública	1.024.615	175.813.832,02	81.162	171,59
Serviço Público	960.780	197.536.595,73	71.684	205,60
Consumo Próprio	44.237	12.383.710,73	8.216	304,35
Rural Aquicultor	35.333	5.879.632,99	104.112	166,41
Rural Irrigante	166.612	31.141.433,39	52.411	189,18
<b>Total Geral</b>	<b>26.344.400</b>	<b>7.063.279.448,99</b>	<b>68.364.269</b>	<b>268,11</b>

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base nos dados obtidos em [119].

Multiplicando-se a tarifa média ponderada (R\$ 268,11) pelo valor das perdas convertido para MWh (102.755.000), o valor obtido é de R\$ 27.549.643.050,00. Este número informa, em ordem de grandeza, sobre o impacto financeiro deste estudo. A tarifa média ponderada foi obtida multiplicando-se cada valor de tarifa pelo número de consumidores da mesma, somando os resultados e dividindo pelo total geral de consumidores.

Após a identificação do total de perdas técnicas, torna-se necessário realizar um levantamento mais detalhado, buscando identificar onde elas estão situadas ao longo do sistema elétrico. As perdas estarão distribuídas nos estágios de geração, transformação, transmissão e distribuição. A Figura 4.2 ilustra essa distribuição, de modo simplificado.



**Figura 4.2:** Alocação de perdas no sistema elétrico. **Fonte:** Elaborado pelo autor, com base em imagens disponibilizadas na internet.

Para calcular esta distribuição, será realizado um procedimento análogo àquele realizado em [70]. O princípio deste método é gerar uma planilha de cálculo, que simule o percurso entre geração, transformação, transmissão e distribuição de eletricidade. É importante observar que esta planilha prevê uma série de aproximações, e, portanto, é uma fonte de incerteza no estudo. Entretanto, há possibilidade de uso de outros modelos para alocação das perdas, como, por exemplo, aqueles discutidos em [71, 72]. O resultado da aplicação desse modelo é apresentado na Tabela 4.5, cuja formulação será explicada nos próximos parágrafos.

Antes de discutir a análise, é importante detalhar os procedimentos para cálculo de fatores de carga. Tomando as linhas de transmissão como referência, existem perdas de pico (instantâneas ou de demanda) e as perdas médias. Esta diferença explica-se pelo fato de que a linha não carrega sua potência nominal durante todo o tempo, devido à variação do uso de eletricidade pelos consumidores ao longo de um dia, por exemplo.

A partir de dados conhecidos, é possível traçar uma curva que relaciona quantas horas por dia a linha carrega 25 ou 30 ou mesmo 100% de sua capacidade. Este conceito define o fator de carga [14, 78, 79].

Para este trabalho, optou-se por adotar a curva típica apresentada em [14]. Assim, o fator de carga calculado é de 0,55. O cálculo de perdas Joule, por envolver o quadrado da corrente, utiliza outro fator, 0,3636, que é a integral da função normalizada

ao quadrado. Já as perdas CA na linha, que variam com o cubo da corrente, envolvem a integral do cubo da função normalizada, levando ao fator 0,25.

Conhecidos os fatores de carga, que serão explorados no decorrer desta análise, a planilha utilizada foi ilustrada através da Tabela 4.5. Na primeira coluna, a sequência de linhas informa cada passo de um sistema elétrico “aproximado”, e usado para representar o todo. As células marcadas em amarelo são os valores de entrada.

O primeiro passo do percurso está no processo de geração. Tipicamente, a energia elétrica é gerada em tensão mais baixa, e é elevada para transmissão em alta tensão. Isso está representado pelas linhas “geração” e “transformador elevador T1”. O primeiro parâmetro de entrada está na célula L3, e é obtido da tabela 1, através dos dados obtidos do balanço energético nacional e da extrapolação realizada para o ano de 2015. Trata-se de toda a energia gerada no Brasil. A energia importada não é considerada neste ponto, devido a operação de transformação ser realizada antes do sistema nacional, já chegando ao Brasil em valores de tensão para transmissão. O total de energia importada é informado na célula L5, e também foi obtido na Tabela 4.2.

Com os dados de energia consolidados, é necessário, a partir dos mesmos, realizar estimativas para potência, visto que as perdas serão função da especificação nominal dos dispositivos. Por exemplo, o banco de informações de geração da Aneel [80], em 22 de julho de 2011, informa que a capacidade instalada no Brasil é de 114.674.263 kW. Isto não quer dizer que o sistema fornece este total de energia todo o tempo. A relação entre a potência e a energia efetivamente produzida e consumida é chamada fator de capacidade. Este fenômeno é explicado pela variação no consumo de eletricidade no decorrer das horas de um dia. A planilha, através das três últimas células da segunda coluna, possibilita definir o fator de capacidade em diferentes pontos de consumo.

Por exemplo, na terceira célula da décima segunda linha é informada a energia total gerada no sistema brasileiro, avaliada em 575.375 GWh. Esta informação é obtida diretamente do Balanço Energético Nacional. Admitindo-se um fator de capacidade de 0,55, discutido em [14, 70], ajustável no campo “Fator de capacidade Típico”, pode-se obter o valor para potência instalada, dividindo-se o total de energia pelo número de horas de um ano, e logo após pelo fator de capacidade, o que resulta em potência instalada de 119,422 GW. O mesmo raciocínio aplica-se à energia importada.

Igualmente, para análise de perdas, devem ser consideradas a perda no pico (transmissão da máxima energia suportada) e a perda média (considerado o fator de

capacidade). Este tratamento é necessário, pois nem toda perda pode ser mitigada. As perdas a serem consideradas como “potencial de eficiência” são aquelas que podem ser atribuídas ao efeito Joule. Este número deverá ser detalhado durante o estudo, para evitar uma estimativa muito elevada do potencial real.

O primeiro estágio de perdas avaliado é o transformador elevador T1. Considera-se este como o primeiro estágio, conectado logo após o gerador, e responsável por elevar a tensão da energia gerada para tensões de transmissão. Observa-se, na tabela, que 92,1% da energia total passa por estes transformadores, que tipicamente são de potência elevada. A norma técnica ABNT NBR 5356 trata de transformadores de potência [81]. Entre as informações, podem ser encontradas tabelas com valores de perdas para transformadores de diferentes níveis de potência, como por exemplo, aquela mostrada na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4.** Exemplo de perdas em transformadores trifásicos, para classe de tensão 15 kV.

Potência Nominal (kVA)	Perdas no Ferro (kW)	Perdas no Cobre (kW)
15	0,1150	0,3200
30	0,1800	0,5600
45	0,2200	0,7600
75	0,3400	1,1100
112,5	0,4600	1,4900
150	0,6400	1,9100
225	0,9000	2,7000
300	1,1200	3,3600

**Fonte:** Elaborado pelo autor, adaptado de ABNT NBR 5356, edição 1981.

Observa-se que, para os valores de potência mais alta, tipicamente as perdas no cobre são três vezes maiores que as perdas no ferro. Deste modo, o preenchimento das células E4 e G4 segue esta lógica.

Após o primeiro estágio de transformação, vem então a energia importada, e admite-se que toda a energia é então transportada através do sistema de alta tensão (tipicamente entre 765 e 230 kV). Neste ponto, foi escolhido um valor de perdas da ordem de 0,54% [14]. Este valor pode ser ajustado através da célula G6.

Após este estágio, a energia elétrica passa por um transformador abaixador, sendo ajustado para valores de transmissão mais baixos, tipicamente 138 ou 69 kV. Novamente utilizando-se a Tabela 4.5, deve-se considerar, neste estágio, que diferentemente do primeiro estágio, onde tipicamente os transformadores são ajustados de acordo com o tamanho do gerador, aqui os transformadores operam com apenas uma parcela de sua potência nominal. De acordo com [14, 70, 82], optou-se por adotar esta parcela em 70%. Ao adotar este valor, o rendimento deve também ser dividido por ele. Por exemplo, adotando-se perdas neste transformador de 0,08%, o valor escolhido deverá ser 0,08 dividido por 70%, o que leva a 0,12%. O mesmo raciocínio deve ser aplicado nas células E7 e G7.

O estágio de transmissão seguinte, realizado em tensões mais baixas, apresenta mais perdas por conta da tensão mais baixa e corrente mais alta. O valor percentual de perdas é ajustado na célula G8. O valor adotado, neste caso, foi de 2,97%, tomando algumas referências da área de transmissão e perdas [14, 70, 71, 74].

O estágio de transformação T3 antecede os estágios de distribuição, porém, neste estágio, uma parcela da energia é comercializada para grandes clientes, não sendo entregue a estes estágios. Essa parcela é de difícil definição, tendo sido adotado, com base em [14, 70], um valor de 60% de comercialização em tensão mais alta, diretamente dos estágios de transmissão. Porém, diferente de [70], onde o valor é fixo, o modelo em Excel foi pensado e construído de forma que este valor pode ser alterado através da célula 38 da segunda coluna. Por ser um transformador de menor potência nominal, quando comparado aos estágios anteriores, suas perdas também são um pouco maiores, como mostram os valores adotados nas células E9 e G9 [14, 70, 81, 82]. Deve-se novamente observar que estas células podem ser editadas, o que permite realizar rapidamente análises diferenciadas.

Como há comercialização de energia neste ponto, há presença de medidores. De acordo com o regulamento técnico metrológico publicado pelo Inmetro [83], este tipo de medidores pode apresentar erros de medição de até 1%. Optou-se por uma estimativa conservadora, prevendo o erro máximo para o medidor. Este erro é definido na célula E10.

A energia não comercializada neste ponto segue para os estágios de distribuição, onde a tensão é menor, e a corrente maior, o que acarreta em perdas resistivas mais elevadas. O sistema de distribuição recebe, de acordo com as estimativas, 38,77% da

energia (célula K12). Deve-se considerar o fator de carga reduzido para estes sistemas, estimado em 43%.

O sistema de distribuição é bastante complexo, devido aos incontáveis “percursos” possíveis. Adotou-se uma estimativa de 6% de perdas resistivas, mostrado na célula G12, com base na estimativa de [71].

O estágio de transformação T4, tipicamente, é representado por transformadores com valores de potência e tensão menores, que apresentam rendimento inferior, o que pode inclusive ser confirmado em [81]. Pesa também o fato de trabalharem mais tempo com valores de potência abaixo da potência nominal [14], o que leva a valores de perdas maiores, apresentados nas células E13 e G13.

Os medidores de uso residencial, de acordo com o regulamento técnico metrológico publicado pelo Inmetro [83], podem apresentar erros da ordem de 2%, e seguindo a lógica usada no estágio de medição anterior, foi adotado o valor máximo também neste ponto.

A linha 16 mostra o total de vendas, tanto do ponto de vista de potência (célula C16) quanto do ponto de vista de energia (K16). O total de perdas, em potência (célula J17) e em energia (célula R17), quando somadas ao total de vendas, deve apresentar o valor próximo de 100%. A diferença em relação a 100% reflete o fato de que a estimativa do fator de carga não é perfeita.

Apesar dos números obtidos nesta análise, é importante considerar que nem todas as perdas podem ser incluídas na análise, por questões técnicas ou econômicas. Por exemplo, nem toda linha de transmissão pode ser considerada “candidata” ao uso de material supercondutor.

No estudo de caso norte-americano [14], o autor optou por considerar viável a substituição em dois estágios de transformação (T1 e T2), o que levou a um percentual de 0,62% para os transformadores, e optou por considerar viável a substituição do segundo estágio de transmissão, com economia de 1,94%.

Para o estudo de caso brasileiro, optou-se por adotar a mesma parametrização. Não foram encontradas referências que justificassem o aumento do escopo da substituição. Assim, as perdas mitigáveis em transmissão estão nas linhas de 138 e 69 kV, que representam 1,93% do total, ou 12.119,3 GWh. No caso dos transformadores, o percentual ficou em 0,68% do total, ou 4.125,47 GWh.

Os dados obtidos mostram que o maior potencial de economia encontra-se no sistema de transmissão. Apesar disso, os sistemas de transmissão maiores não foram

considerados vantajosos, na análise deste trabalho, ficando excluídos do escopo. Para este tipo de sistema de transmissão, com a tecnologia atual, e sem imaginar grandes avanços, a penalidade criogênica torna-se muito elevada e de complexa instalação, manutenção e operação [14].

**Tabela 4.5.** Levantamento de perdas do sistema elétrico brasileiro.

	Perdas instantâneas (Demanda) - Valores totais									Perdas Médias (energia) - De acordo com fator de carga								
	Potência Média (MW)	Potência %	Potência GW	Xfmr Perdas em Vazio %	Xfmr Perdas em Vazio GW	Perdas I2R %	Perdas I2R GW	Perdas Totais GW	Perdas % em relação ao Total	Energia %	Energia GWh	Xfmr Perdas em Vazio %	Xfmr Perdas em Vazio GWh	Perdas I2R %	Perdas I2R GWh	Perdas Totais GWh	Perdas % em relação ao Total	
Geração	92,1		119,4							92,1	575375							
Transformador Elevador T1	425	92,1	119,4	0,08	0,0955	0,24	0,287	0,382	0,32	92,1	575375	0,145455	836,909	0,16	912,9	1749,81	0,30412	
Importação		7,9	10,25							7,903	49372							
Transmissão Alta Tensão		99,7	129,3			0,54	0,698	0,698	0,53841	99,72	622997			0,36	2223,7	2223,706	0,35594	
Transformador Abaixador T2	300	99,1	128,6	0,12	0,1543	0,25	0,321	0,476	0,36692	99,36	620773	0,216364	1351,73	0,16	1023,9	2375,662	0,38026	
Transmissão Média Tensão		98,8	128,1			2,97	3,805	3,805	2,93436	98,98	618398			1,94	12119	12119,33	1,93988	
Transformador Abaixador T3	30	95,8	124,3	0,22	0,2735	0,47	0,584	0,858	0,66147	97,04	606278	0,416367	2395,67	0,3	1860,9	4256,583	0,68133	
Medidor	60%	45,6	59,14	1	0,5914			0,591	0,45609	58,05	362651	1,428571	5180,72			5180,722	0,82925	
Vendas		45,2	58,55							57,22	357470							
Distribuição Primária		49,6	64,31			6	3,859	3,859	6	38,77	242243			3,4	8112,3	8112,312	1,2985	
Transformador de Distribuição T4		46,6	60,45	1,08	0,6529	2,7	1,632	1,632	1,77				5719,18		3431,5	9150,688	1,4647	
Medidor		45,4	58,82	2	1,1764			1,176	0,9				10305,1			10305,11	1,64949	
Vendas		44,5	57,64							34,75	217129							
Total de Vendas		89,6	116,2							91,97	525844							
Total de Perdas		13,9	18,08					13,47	13,9472	8,903	98903					55473,93	8,90346	
Total de Vendas e Perdas		104	134,3							100,9	624747							
Total de Geração e Importação		100	129,7															
Total Perdas de Transmissão																	3,59431	
Perdas Associáveis a Supercondutores															29685			
VOLT 1			230															
VOLT 2			138															
Fator de Carga Médio			0,55															
Fator de Carga para Transmissão			0,7															
Fator de Carga para Distribuição			0,437															
Fator de Demanda de Energia 55			0,36															
Fator de Demanda de Energia 43			0,24															
Perdas de Transmissão - Elimináveis HTS																12119,33	1,93988	
Perdas de Transformação - Elimináveis HTS																4125,472	0,68438	
Percentual de Vendas Após T3		60	%		0,6													
Fator de Carga para venda após T3		70	%		0,7													
Fator de Carga Típico		55	%		0,55													
Fator de Carga para Distribuição		43	%		0,43													

Fonte: Elaborado pelo autor, com base na referência [14].

### 4.2.3. Estimativa de Custo dos Fios

Para realização da avaliação de penetração de mercado, há necessidade de realizar uma série de estimativas, algumas técnicas e outras econômicas. Tais estimativas são determinadas pelo analista, sendo função das referências consultadas, especialistas consultados, do cenário corrente e ainda do conhecimento pessoal do mesmo.

Dentre estas estimativas, uma das mais relevantes envolve a definição dos custos futuros dos fios HTS. Os fios são matéria prima para fabricação de variadas aplicações, entre elas motores, cabos, geradores e transformadores, estando estas no âmbito deste estudo.

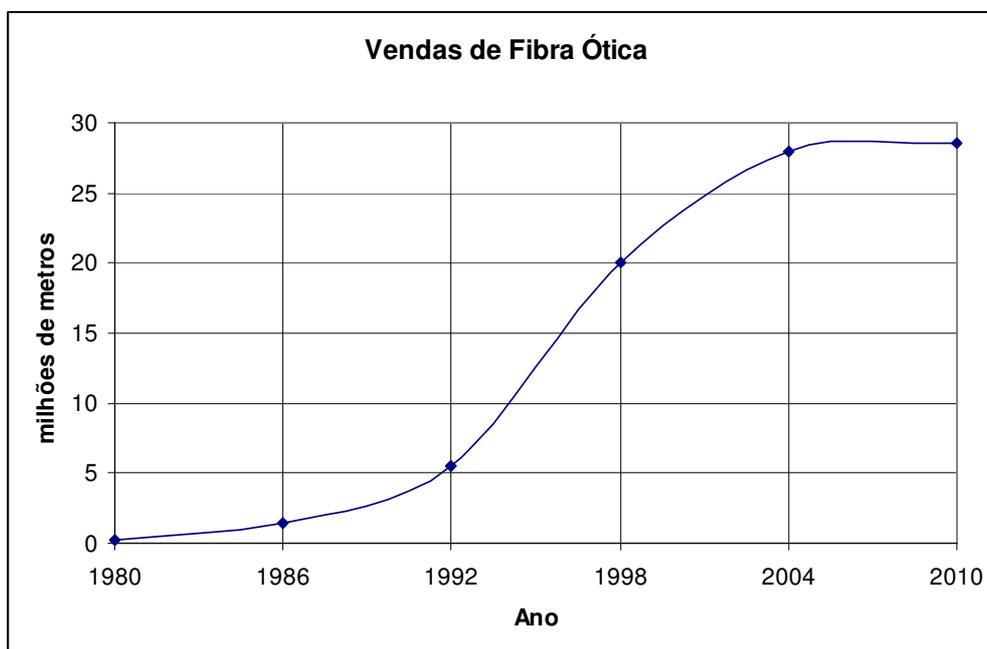
Como uma nova tecnologia, naturalmente existem riscos. É possível, por exemplo, que ao longo do tempo, surjam possíveis substitutos, ou até que o progresso esperado e aprimoramento das técnicas de fabricação não venham a concretizar-se [84]. Porém, como citado anteriormente, este modelo parte do princípio de que a tecnologia se tornará comercial e viável.

Por tratar-se de uma tecnologia ainda em maturação, entende-se que, a experiência adquirida pelos fabricantes no decorrer do tempo possibilitará aperfeiçoar e baratear as técnicas de fabricação, levando a conseqüente economia de escala. Apesar da maioria dos estudos e pesquisas estar ainda focado em universidades e laboratórios, a instalação de protótipos de diferentes aplicações vem crescendo, como, por exemplo no sistema de transmissão da “Long Island Power Authority” [85] e até mesmo começam a surgir aplicações comerciais como os fornos de indução desenvolvidos pela empresa Zenergy [86].

De modo a modelar a evolução do custo e da capacidade de condução do material, o estudo do caso norte-americano foi baseado em uma analogia a tecnologia da fibra ótica [14]. Do mesmo modo que os materiais HTS, a fibra ótica foi uma tecnologia que teve grande desenvolvimento laboratorial antes de trazer mudanças ao mercado de telecomunicações. É interessante observar, na Figura 4.3, a evolução das vendas de fibra ótica. Ela segue o formato de uma “Curva S”.

A analogia também se justifica no sentido de que a expectativa não é apenas pela redução do custo do material, mas também por melhorias na sua característica. Para fibra ótica, melhorias na capacidade de transmissão de dados. No caso da

supercondutividade, é esperado que o material supercondutor possa ter sua capacidade de condução de corrente melhorada ao longo do tempo.



**Figura 4.3:** Evolução de vendas de fibra ótica. **Fonte:** Elaborado pelo autor, a partir de [14].

A fibra ótica, desde o seu desenvolvimento até sua comercialização, trouxe como principal característica o surgimento de um meio de transmissão muito avançado, e que hoje viabiliza grandes taxas de transmissão de dados, inatingíveis através de fios de cobre. A expectativa é que a supercondutividade terá efeito parecido no que diz respeito à transmissão de energia elétrica: a capacidade de transmissão de sistemas baseados nesta tecnologia será bastante superior aos padrões atuais.

Avaliando-se os dados disponíveis, a respeito da história da fibra ótica, observa-se que entre sua criação (1967) e sua disponibilidade comercial (1984) foram decorridos 17 anos. Porém, o avanço técnico, que viabilizou a implantação de meios de transmissão mais avançados, deu-se em 1997 (30 anos após sua criação), quando então a tecnologia atingiu o índice e custo economicamente viáveis para sua expansão.

Analogamente, com a sintetização de material HTS em 1987, e seguindo a mesma linha do tempo, o autor do estudo norte-americano atribuiu ao ano de 2004 a disponibilidade comercial do material, e em 2017, um nível comercial e técnico capaz de favorecer sua entrada no mercado.

Avaliando-se o panorama atual, pode-se observar que a estimativa realizada na ocasião revelou-se otimista. Atualmente, embora seja possível adquirir o material HTS, ainda há limitações nos processos de fabricação, de modo que a escala de fabricação ainda não é grande o bastante para viabilizar economias de escala.

Através de uma cotação da empresa American Superconductor, para compra de fios [87], realizada em 2007, e comparando-se com a expectativa de queda de preço definida em [14], observa-se uma diferença de 10 anos em relação à estimativa realizada para o caso norte-americano.

Considerando-se a observação da dos dados do caso norte-americano, e ainda os dados apresentados em [88], pelo Departamento de Energia Americano (DOE), que discorrem acerca da expectativa de evolução dos fios, optou-se por realizar a analogia, porém, com 10 anos de diferença, observados na comparação, deslocando-se a expectativa de avanço na tecnologia e redução de preços para 2027. A Tabela 4.6 ilustra alguns dos principais marcos. As suposições são assinaladas com um “\*”.

**Tabela 4.6.** Marcos históricos da fibra ótica e supercondutores.

<b>Fibra Ótica</b>		<b>Caso Americano</b>		<b>Caso Brasileiro</b>	
<b>Ano</b>	<b>Fato</b>	<b>Ano</b>	<b>Fato</b>	<b>Ano</b>	<b>Fato</b>
1967	Criação	1987	Criação	1987	Criação
1976	Primeira Instalação	1993	Primeiro Cabo	1993	Primeiro Cabo
1977	Marco Comercial (primeiras vendas)	1997	Marco Comercial (primeiras vendas)	2017*	Marco Comercial (primeiras vendas)
1997	Comercialização em escala	2017*	Comercialização em escala	2027*	Comercialização em escala

**Fonte:** Elaborado pelo autor, adaptado de [14].

#### **4.2.4. Penetração de Mercado**

Novas tecnologias são fundamentais para pesquisa, desenvolvimento e surgimento de novos produtos e soluções. Entretanto, novos produtos precisam identificar novos nichos de mercado (soluções técnicas) ou definir maneiras de resolver problemas existentes a partir de soluções mais econômicas financeiramente (custo-benefício).

No caso da supercondutividade, há características de ambos os casos. Poderia ser citado o caso do limitador de corrente supercondutor, tecnologia nova e capaz de apresentar uma solução técnica inovadora. Por outro lado, as soluções apresentadas neste estudo, embora também apresentem ganhos técnicos, estão sendo tratadas no âmbito da economia financeira.

A determinação da taxa de mercado parte deste princípio. Porém, de acordo com a situação e evolução do preço, a penetração pode se manifestar em duas diferentes frentes: novas instalações e taxa de substituição dos dispositivos atualmente em uso.

O modelo matemático adotado para modelar a penetração foi a “Curva S” [14]. Esta curva representa, basicamente, que um produto passa por diferentes fases durante sua “maturação”, especialmente inovação, massificação e saturação. No primeiro momento, a empresa lança o produto ainda não testado pelo mercado, em busca dos primeiros compradores (definido anteriormente como micro-mercado, de acordo com Mullins). Em seguida, caso o produto tenha boa aceitação, a produção eleva-se, criando uma espécie de efeito cascata, que é encerrado quando o produto se tornou acessível à maioria dos consumidores, tendo assim o mesmo percorrido a curva “S”.

Existem quatro parâmetros a serem definidos para aplicação do modelo da curva S, a saber:

- Ano onde se inicia a penetração da tecnologia.
- Velocidade na qual a tecnologia cresce no mercado.
- Tempo necessário para que 50% do mercado seja atingido.
- Fração máxima do mercado que será capturada.

A definição da curva S é dada por

$$F(t) = b \frac{e^{-\frac{t-c}{a}}}{e^{-\frac{t-c}{a}} + e^{\frac{t-c}{a}}}, \quad (4.1)$$

em que  $t$  é o ano inicial,  $b$  é o valor assintótico máximo (até quanto a tecnologia pode atingir ou ainda, fração máxima),  $c$  é o tempo para o qual 50% do mercado é atingido (metade do mercado é representado por metade do máximo expresso em  $b$ ), e  $a$  é o parâmetro que define a velocidade de captura do mercado.

O parâmetro  $a$  pode ser expresso de diferentes maneiras. Por exemplo, duas vezes “ $a$ ” é o número de anos necessários entre uma penetração de 12 e 88% de mercado. Outra forma é definir que, em determinado ano “ $t$ ”,  $F(t)$  equivale a certo valor, definir “ $b$ ” e “ $c$ ”, e calcular “ $a$ ” a partir destes valores. Este método é conhecido como “penetração no ano  $t$ ”.

Utilizando-se o método de penetração no ano “ $t$ ”, o estudo de caso norte-americano [14] assumiu os valores mostrados na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7.** Parâmetros para o caso norte-americano.

<b>Aplicação</b>	<b>Ano inicial</b>	<b>Ano “<math>t</math>”</b>	<b>Percentual no ano “<math>t</math>”</b>	<b>Anos até 50% de penetração</b>	<b>Fração máxima (%)</b>
Motor	2009	2011	0,10	12	75
Transformador	2014	2017	0,25	10	80
Cabo	2008	2010	0,20	11	50
Gerador	2007	2012	0,30	13	45

**Fonte:** Referência [14].

Esta parte do estudo é bastante dependente das percepções do analista. Embora o acompanhamento do mercado e dos fabricantes possa dar algum subsídio a estas escolhas, aqui é necessário construir um cenário baseado em algumas opiniões. Uma das fontes de consulta utilizada aqui foi a leitura e acompanhamento do periódico “Superconductor Week”.

É importante observar que a fração máxima atingida é relativa a novas instalações e aos dispositivos substituídos durante o período de tempo analisado. É apenas um subconjunto de todo o sistema elétrico, não representando todos os dispositivos já instalados. A fração máxima reflete também uma expectativa relacionada à quão atrativa será a tecnologia no longo prazo. Quanto maior o valor, maior será a presença da tecnologia no futuro.

Baseado no cenário norte-americano, o que se observou, ao longo dos anos, foi uma penetração da tecnologia mais modesta que a previsão inicial. Observando-se o comportamento do mercado, entre 2000 e 2010, o principal fator que freou a penetração da tecnologia foi o custo do material supercondutor, e o custo da criogenia, que não

evoluíram conforme esperado. Não foi possível realizar uma avaliação das escolhas iniciais, porém, houve um aumento na instalação de protótipos, e até a disponibilização de alguns dispositivos empregando supercondutividade, ainda que numa taxa abaixo da prevista. Foi observada também a presença de aplicações tecnologicamente novas.

Apesar disso, algumas das suposições feitas no trabalho original mostraram-se interessantes e serão também utilizadas no caso brasileiro. Um primeiro fator importante é deslocar as curvas no tempo, de modo que o ano inicial esteja mais à frente. E apresenta-se aqui um diferencial em relação ao trabalho original: uma pesquisa entre especialistas do ramo, visando ampliar o espectro de opiniões.

Deste modo, para formulação do cenário, serão considerados:

- A instalação de protótipos, pois estes são um primeiro passo para disponibilidade comercial de dispositivos.
- Notícias veiculadas através da Superconductor Week, que podem considerar inclusive patentes registradas.
- Opinião de especialistas do ramo, retiradas do relatório da Bento Strategy [64, 65, 66] e da análise do grupo CONECTUS [52].

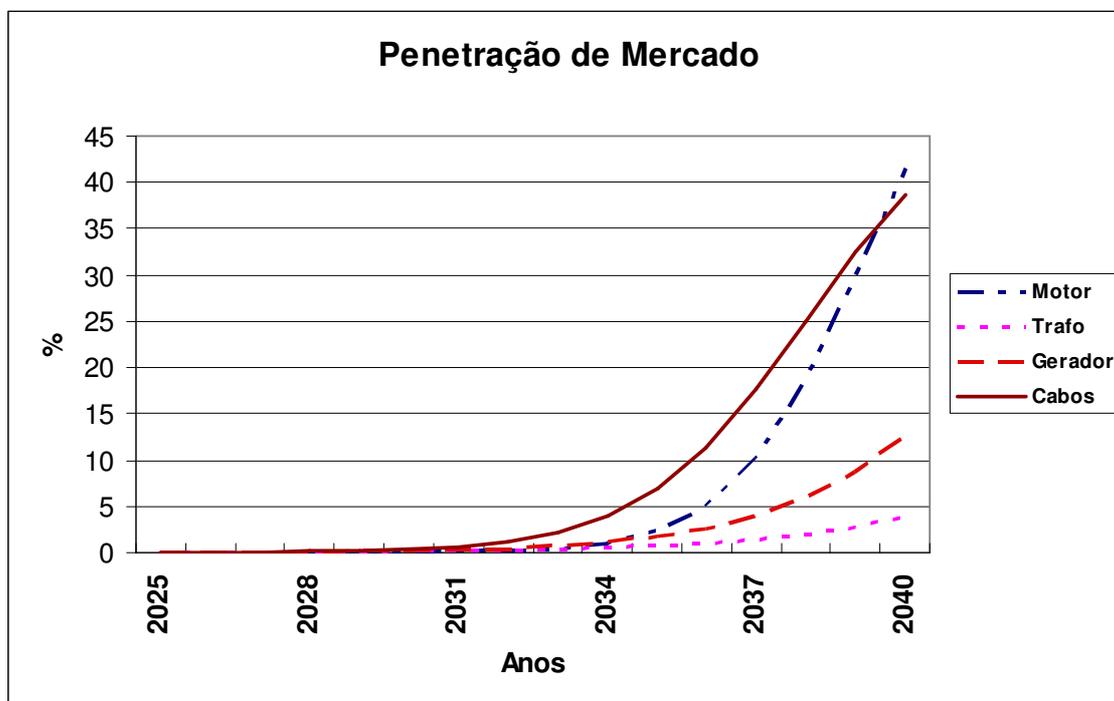
Baseado nestes fatores e observando-se o estado da arte apresentado no capítulo 2, as fontes de dados citadas acima, e o cenário do estudo de caso norte-americano, o cenário Brasil foi estimado, e os dados sugeridos para realização do estudo estão apresentados na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8.** Parâmetros para o caso brasileiro.

<b>Aplicação</b>	<b>Ano inicial</b>	<b>Ano “t”</b>	<b>Percentual no ano “t”</b>	<b>Anos até 50% de penetração</b>	<b>Fração máxima (%)</b>
Motor	2026	2032	0,10	15	60
Transformador	2030	2033	0,25	20	70
Cabo	2022	2030	0,20	18	50
Gerador	2023	2032	0,30	22	60

**Fonte:** Elaborado pelo autor, baseado na referência [14].

As curvas “S”, resultantes desta parametrização, que representarão os fatores de penetração de mercado de cada aplicação, podem ser vistas na Figura 4.4, extraída da planilha “*Graphs*”, do modelo de simulação.



**Figura 4.4:** Evolução da penetração de mercado. **Fonte:** Elaborado pelo autor, a partir de [14].

Deve-se observar, pelas curvas, que as estimativas realizadas aqui, para a penetração de novos dispositivos HTS, supõem a entrada de novas aplicações. Porém, por tratar-se de uma tecnologia nova, e ainda com alguns pontos técnicos a serem solucionados, a expectativa, baseado inclusive em informações de mercado, é a de real possibilidade de uso de supercondutores de alta temperatura, porém, com uma penetração tecnológica iniciada em meados de 2030, porém, estendendo-se para após 2040. Existe a possibilidade de desenvolver o estudo para anos posteriores a 2040, porém, entendeu-se aqui que este tipo de análise apresentaria uma incerteza elevada, e que seria mais conveniente realizar este estudo como o primeiro, com perspectiva de executá-lo novamente periodicamente, fazendo análises para anos posteriores no futuro.

Uma sugestão de metodologia para definir o período de re-execução do modelo seria atrelar a nova execução a descobertas na área, ou grandes discontinuidades tecnológicas. Uma execução anual também poderia ser realizada, e ao longo dos anos, observando-se a variação do estudo, o período anual poderia ser estendido (variação pequena ano a ano) ou reduzido (grande variação observada com análises anuais).

Esta parte do estudo possibilita realizar um estudo de sensibilidade. Por exemplo, avaliar o efeito de um programa de incentivo a substituição de motores, através de subsídio governamental: talvez uma medida deste tipo possa reduzir o parâmetro de “anos até 50% de penetração”, e chegar a uma avaliação diferente na simulação do modelo final.

Em comparação com o caso anterior, as principais mudanças dizem respeito ao ano inicial, ao ano “t” e a fração máxima atingida por cada aplicação. A mudança da fração máxima é baseada na observação do mercado, especialmente instalação de protótipos, projetos de P & D, patentes e opiniões coletadas.

O ano inicial, bem como o ano “t”, são influenciados diretamente pela capacidade da indústria em fornecer o fio supercondutor a preços menores. Grandes discontinuidades no valor dos fios podem deslocar esta estimativa para antes ou depois do previsto. É interessante observar também que, apesar da similaridade tecnológica entre motores e geradores, sua penetração depende de agentes diferentes: os geradores estão mais relacionados a empreendimentos de geração de energia, que estão associados a produtores independentes e concessionárias. Já os motores estão mais presentes no ramo industrial, o que sugere que sua aceitação de mercado deverá atingir mais agentes (o universo industrial é maior e mais diversificado que o de concessionárias).

Importante também é estimar o quão rápido a tecnologia pode se consolidar como confiável [14], pois se esta consolidação for mais rápida, o parâmetro de 50% da penetração pode ser reduzido, levando a curva “S” a saturação (fração máxima) mais rapidamente.

#### **4.2.5. Avaliação da Criogenia**

Os sistemas de criogenia são necessários ao funcionamento dos sistemas supercondutores. A energia consumida pelo sistema é tratada como uma perda, inerente ao funcionamento dos sistemas supercondutores, que deverá ser descontada nos cálculos e balanços. De forma geral, o benefício de uma aplicação envolve perdas mitigadas em relação à aplicação tradicional menos as perdas criogênicas, típicas das aplicações de supercondutores.

Conforme discutido no início deste capítulo, este estudo admite que a tecnologia de supercondutividade se tornará efetiva, e isto não envolve apenas o desenvolvimento e

redução do material supercondutor, mas também dos equipamentos associados a criogenia, que precisam apresentar determinados níveis de eficiência e custo.

Assim como no caso do custo do material supercondutor, o estudo de caso norte-americano [14] admite que a tecnologia de criogenia obterá avanços em relação ao atual, tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista de custos, e que estes avanços serão suficiente para viabilizar a aplicação dos supercondutores.

De acordo com o relatório de aplicação de materiais HTS [89], já é possível encontrar sistemas compatíveis com a potência necessária às aplicações de supercondutividade. Porém, não havia ainda, em 2003, redução de custos ou um aumento considerável de vendas, que permitam inferir uma redução de preço por economia de escala.

Consultando-se especificações de um fabricante, a Cold Edge Tec [90], observa-se que as estimativas realizadas em [14] para os avanços técnicos nestes sistemas ainda não foram atingidas.

Um relatório acerca do uso de sistemas de criogenia do tipo “Pulse Tube”, datado de 2008 [91], indica que o mercado de venda destes sistemas está em crescimento, de acordo com depoimento dos fabricantes. Há uma estimativa de crescimento para os 15 anos seguintes, ou seja, até 2023. Admite-se que, o aumento de vendas leva a redução de preços e aperfeiçoamento da tecnologia.

Ainda de acordo com [91], há um potencial de comercialização de sistemas deste tipo por até 1.000,00 euros, dependendo da escala de fabricação. O preço atual é estimado entre 3.000,00 e 6.000,00 euros.

Considerado o cenário atual apresentado, optou-se por considerar as suposições do estudo norte-americano, porém, defasadas no tempo, do mesmo modo que foi tratada a evolução do custo do material supercondutor. Isto implica em um custo de 4.300,00 dólares/kW.

De modo a verificar a potência necessária para retirar uma unidade de calor, é necessário conhecer a temperatura de operação e o percentual da eficiência de Carnot que o sistema atinge [14]. A eficiência de Carnot, representada por  $\eta_c$ , é definida como  $T_c / (T_h - T_c)$ , em que  $T_c$  representa a temperatura a ser atingida e  $T_h$  é a temperatura ambiente, tipicamente adotada como 300 K. Os sistemas reais conseguem atingir até 20% da eficiência de Carnot [14], de modo que a eficiência “real” deste tipo de sistema é o produto entre a eficiência de Carnot e o percentual desta que o sistema pode atingir.

Multiplicando-se  $\eta_c$  pelo percentual da eficiência atingido, e invertendo-se o resultado, o valor calculado indica a potência específica (SP) do sistema, que representa o número de Watts (potência) necessário para retirar 1 W de calor do sistema. A Tabela 4.9 indica o cálculo de SP, para 20 e 30% da eficiência de Carnot, e temperatura ambiente de 300 K.

**Tabela 4.9.** Potência específica para temperatura ambiente de 300 K.

$T_c$ (K)	$\eta_c$	SP (20%)	SP (30%)
77	0,345	14,5	9,7
70	0,304	16,4	11,0
30	0,111	45,0	30,0

Fonte: Referência [14].

Por exemplo, tomando-se a segunda linha da tabela, para atingir uma temperatura fria de 70 K, são necessários 16,4 W por Watt de calor removido, admitindo-se que o sistema atinge 20% da eficiência de Carnot (neste caso 0,304).

O valor de 30% da eficiência de Carnot, indicado na quarta coluna, é uma estimativa do aperfeiçoamento da tecnologia, que leva a valores menores, e por consequência melhores, de SP. Admite-se que este avanço, de 20 para 30%, ocorrerá ao longo dos 25 anos da avaliação aqui realizada (2015-2040).

O autor do estudo norte-americano [14] aponta que 300 K é uma temperatura típica de laboratórios, sendo mais comum na prática o valor de 322 K. Adotando-se esta temperatura como ambiente, a tabela 8 é recalculada, para então serem obtidos os dados que são apresentados na Tabela 4.10.

**Tabela 4.10.** Potência específica para temperatura ambiente de 322 K.

$T_c$ (K)	$\eta_c$	SP (24%)	SP (30%)
77	0,314	13,3	10,6
70	0,278	15,1	12,0
30	0,103	67,1	53,3

Fonte: Referência [14].

Por exemplo, adotando-se a linha que representa a temperatura de 70 K, com rendimento de 30% da eficiência de Carnot, são necessários 12 W para remover cada 1 W de calor. Este valor será empregado durante a análise.

Outra premissa a ser admitida diz respeito a maiores perdas em sistemas criogênicos utilizados em sistemas rotativos. Assim, a potência específica aplicável a geradores e motores é admitida como 12 W, e, para cabos e transformadores, reduzida para 11 W.

#### **4.2.6. Comparativo de Motores**

Para cada uma das aplicações abrangidas neste estudo, há necessidade de realizar um estudo comparativo, entre sua aplicação tradicional (utilizando material convencional, como cobre e ferro) e aquela baseada em material supercondutor (HTS). O objetivo principal desta avaliação é definir o diferencial de custos evitados devido à redução de perdas no caso do dispositivo que emprega supercondutores em sua construção.

A substituição de motores convencionais por motores supercondutores tem como principal consequência redução das perdas, que reflete em operação mais econômica durante o ciclo de vida do motor. Deve-se considerar, nesta comparação, que a economia depende da energia economizada subtraída daquela necessária a criogenia.

Existem diferentes tipos e categorias de motores elétricos. Motores de corrente contínua, motores síncronos, motores de indução, entre vários outros. A literatura destaca a presença do motor de indução trifásico como o grande responsável pela geração de força motriz, respondendo por até 75% do total de motores existentes no Brasil [92]. O estudo de perdas poderia ser diferenciado para cada tipo de motor, porém, considerando-se o grande predomínio dos motores de indução, será inserida uma simplificação, tratando-se todas as perdas como as deste tipo de motor.

O motor elétrico apresenta vários tipos de perdas, que, em geral, se dividem em perdas fixas, se não dependem do carregamento, e variáveis, se o fazem [92]. As perdas fixas são:

- Perdas no ferro (núcleos): são as perdas devido à circulação do campo magnético – por histerese e correntes parasitas. Dependem da frequência da rede (60 Hz, no Brasil), da densidade do campo (quanto menos ferro, mais denso), da qualidade do aço (o aço silício é mais suscetível ao campo

magnético), da espessura e isolamento das chapas. Representam de 15 a 25% do total de perdas em operação nominal.

- Perdas mecânicas: perdas por atrito, nos mancais, e ventilação. Contribuem com 5 a 15%.

As perdas variáveis são:

- Perdas no estator: devidas ao efeito Joule pela circulação de corrente no enrolamento do estator, significam a maior parcela de perda em condição nominal: 25 a 40%. Dependem da bitola dos condutores e do comprimento das bobinas.
- Perdas no rotor: igualmente devidas ao efeito Joule nas barras e anéis do rotor, têm também uma contribuição significativa: 15 a 25%. Dependem do material (em geral, alumínio para motores em baixa tensão), seção e comprimento das barras.
- Perdas suplementares: são devidas a várias imperfeições na distribuição dos fluxos magnéticos e de corrente e geralmente medidas por subtração com relação às demais perdas. Podem ser reduzidas com um bom projeto do motor. Representam uma parcela menor nos motores de baixa tensão, 10 a 20%.

A principal parcela de perdas eliminada pelo uso de motores supercondutores é aquela advinda do efeito Joule. Porém, pode-se observar que também há redução em outras categorias, inclusive devido a seu menor volume, menor uso de ferro e redução de atrito [3, 19].

De acordo com as referências consultadas, estima-se que aproximadamente 50% das perdas de um motor convencional podem ser mitigadas [3, 19, 93, 94]. Significaria substituir um motor com eficiência de 96% por um outro, com eficiência de até 98%.

Em relação ao número de “50%” de redução de perdas, deve-se considerar que estas perdas são “brutas”, e não estão considerando a necessidade de criogenia do motor. Na análise econômica de um motor supercondutor, além dos custos do mesmo, devem ser considerados também o custo de aquisição do sistema de criogenia e de sua operação ao longo do tempo. Por exemplo, o protótipo de motor de 4480 kW apresentado em [93] teve um sistema de criogenia responsável pelo consumo de 7 kW, ou 0,16% da potência nominal.

As referências consultadas [3, 14, 93, 95] citam que o uso de fios supercondutores de primeira geração, operando a 30K, não são economicamente viáveis, especialmente devido a baixa expectativa em relação à redução de custos dos fios de primeira geração, que utilizam prata. A penalidade devido à necessidade de criogenia também seria alta. Deste modo, o estudo levará em consideração motores fabricados com enrolamentos de material supercondutor a 70K, e materiais com expectativa maior por redução nos custos de fabricação.

Considerando-se o trabalho desenvolvido por especialistas da área [92] e alguns dados obtidos diretamente [96], foi montada uma estimativa a respeito do parque nacional de motores. A Tabela 4.11 apresenta estes dados.

**Tabela 4.11.** Vendas de motores trifásicos no Brasil

<b>Ano</b>	<b>Até 1 cv (0,736 kW)</b>	<b>De 1 cv (0,736 kW) até 10 cv (7,36 kW)</b>	<b>De 10 cv (7,36 kW) até 40 cv (29,42 kW)</b>	<b>De 40 cv (29,42 kW) até 100 cv (73,55 kW)</b>	<b>De 100 cv (73,55 kW) até 300 cv (220,65 kW)</b>	<b>Acima de 300 cv (220,65 kW)</b>	<b>Total</b>
1989	320.501	587.707	84.710	13.907	4.732	322	1.011.879
1990	274.952	495.607	61.228	11.401	3.862	233	847.283
1991	256.421	465.252	54.891	8.713	3.200	187	788.664
1992	227.869	421.557	58.401	10.585	3.591	183	722.186
1993	235.828	446.430	59.077	11.340	3.700	272	756.647
1994	328.353	537.670	77.947	14.544	4.951	360	963.825
1995	443.169	716.855	98.614	19.390	7.395	548	1.285.971
1996	356.815	600.791	88.195	17.798	6.778	686	1.071.063
1997	396.482	711.519	113.125	23.024	9.695	892	1.254.737

1998	335.721	704.677	132.524	25.621	10.981	1.236	1.210.760
1999	354.510	676.130	115.207	22.203	9.224	945	1.178.219
2000	449.907	770.264	132.125	26.461	10.360	917	1.390.034
2001	471.052	806.466	143.355	28.895	11.313	1.001	1.462.082
2002	493.192	844.370	155.540	31.553	12.353	1.093	1.538.101
2003	516.372	884.055	168.761	34.456	13.490	1.194	1.618.328
2004	540.641	925.606	183.106	37.626	14.731	1.303	1.703.013
2005	566.051	969.109	198.670	41.088	16.086	1.423	1.792.427
2006	592.656	1.014.658	215.557	44.868	17.566	1.554	1.886.859
2007	620.511	1.062.347	233.880	48.996	19.183	1.697	1.986.614
2008	649.675	1.112.277	253.759	53.504	20.947	1.854	2.092.016
2009	680.209	1.164.554	275.329	58.426	22.875	2.024	2.203.417
2010	712.179	1.219.000	298.732	63.801	24.979	2.211	2.320.902
2011	745.652	1.276.595	324.124	69.671	27.277	2.414	2.445.733
2012	780.697	1.336.595	351.675	76.081	29.787	2.636	2.577.471
2013	817.390	1.399.415	381.567	83.080	32.527	2.879	2.716.858
2014	855.807	1.465.187	414.000	90.724	35.520	3.144	2.864.382
2015	896.030	1.534.051	449.191	99.070	38.788	3.433	3.020.563
<b>Total</b>	<b>13.918.642</b>	<b>24.148.744</b>	<b>5.123.290</b>	<b>1.066.826</b>	<b>415.891</b>	<b>36.641</b>	<b>44.710.034</b>
<b>(%)</b>	<b>31%</b>	<b>54%</b>	<b>11,5%</b>	<b>2,4%</b>	<b>1%</b>	<b>0,1%</b>	<b>100%</b>

**Fonte:** Elaborado pelo autor, a partir das referências [92,96].

Embora no estudo original [14] o escopo tenha incluído os motores acima de 370 kW, considerando-se os dados disponíveis para o Brasil, obtidos em [92, 96], o escopo do estudo para este caso incluirá os motores acima de 220 kW, que são a categoria de maior potência dentro dos dados consolidados.

Os dados até o ano 2000 foram obtidos em [92]. Aqueles do ano 2010, para as categorias de 1 a 10 cv, 10 a 40 cv, 40 a 100 cv e 100 a 250 cv, são de [96], enquanto os outros foram obtidos através da extrapolação dos dados conhecidos.

O conjunto de dados obtido junto a [96] apresentou diferentes taxas de crescimento, para diferentes potências de motor. Atribuiu-se esta variação a fatos apresentados no PNE, que ressaltam o aumento de atividades que demandam motores maiores. Assim, para categoria acima de 300cv, adotou-se uma taxa mais elevada,

similar a das categorias de 40 a 100cv e 100 a 250cv (9,2%). Para os motores menores, até 1cv, utilizou-se a taxa menor, também utilizada na categoria 1 a 10cv (4,7%).

Dado o atual cenário econômico de crescimento do país, e os cenários traçados pela EPE [67], entende-se que as estimativas de aumento, embora possam ser consideradas otimistas, estão de acordo com a atual conjuntura econômica.

Pode-se observar, a partir da tabela, e a partir do escopo selecionado (motores acima de 300 cv), que a população de motores, a ser avaliada no estudo, consiste em 36.641 motores, ou, aproximadamente, 0,1% dos motores do Brasil.

Analogamente ao desenvolvido em [14], realizou-se um resumo sobre os motores selecionados acima. Foi montada a Tabela 4.12, detalhando a obtenção dos dados necessários e sua fonte. No campo de referência, foi adotada a convenção “L” seguido da linha envolvida, quando for o caso.

**Tabela 4.12.** Comparativo de motor convencional x HTS

<b>Número da Linha</b>	<b>Dado</b>	<b>Valor</b>	<b>Referência</b>
1	Potência média nominal (kW)	748	L6/L7
2	Número de Motores	36.641	Tabela 4.11
3	Energia usada (GWh/ano)	131.461	Tabela 4.5, [92, 97]
4	Horas de operação de cada motor por ano (h)	7.256	[14, 92]
5	Energia média anual por motor (MWh/motor/ano)	3.588	L3/L2
6	Potência média utilizada por motor (kW)	494	L5/L4
7	Fator de Carga	68%	[14, 92]

<b>8</b>	<b>PERDAS MITIGÁVEIS EM MOTORES CONVENCIONAIS</b>		
9	Perdas no Ferro Mitigadas	0,51%	[14]
10	Perdas mecânicas (atrito) Mitigadas	0,28%	[14]
11	Perdas Joule mitigáveis	0,61%	[14]
12	Total mitigável	1,40%	L9+L10+L11
13	Total Mitigável por ano (MWh/motor/ano)	50,23	L5*L12
<b>14</b>	<b>PERDAS EM MOTORES HTS</b>		
15	Perdas Fixas (W/motor)	41	[14]
16	Perdas por uso (W/kW)	0,03	[14]
17	Temperatura de operação (K)	70	[14, 98, 99]
18	Potência específica (SP)	12	[14, 98, 99]
19	Eficiência Carnot	30%	[14, 98, 99]
20	Perda Anual em Criogenia (MWh/motor/ano)	3,6	$(L15*L4/1000+L16*L5)*L18/1000$
21	Perda Máxima (kW/motor)	0,761	$(L15+L16*L1)*L18/1000$
<b>22</b>	<b>COMPARATIVO DE PERDAS LÍQUIDAS EVITADAS</b>		
23	(MWh/motor/ano)	46,63	L13-L20
24	(%)	1,29%	$(L23/L5)*100$
25	Custo médio da Energia em 2040 (\$/MWh)	140,00	Tabela 4.3, [100, 101]

26	Economia média (\$/motor/ano)	6.528,20	L25*L23
27	Vida Útil Média de um motor (anos)	30	[57]
28	Economia total (\$)	195.846,00	L26*L27
29	Taxa de desconto	10%	[14]
30	Valor Líquido Presente economizado (\$)	62.044,04	[14]
31	Custo do fio em 2040 (\$)	20,00	[14]
32	Fio necessário por motor (metros)	500	[14]
33	Custo do fio para cada motor (\$)	11.600,00	L31*L32
34	Custo da Criogenia por motor (\$)	3.276,87	L21*4.306 [14]
35	Economia por motor (\$/motor)	47.167,17	L30-L33-L34
36	Economia por kW (\$/kW)	63,06	L35/L1
37	Custo do motor convencional (\$)	150.000,00	[102]

**Fonte:** Elaborado pelo autor, a partir das referências apresentadas ao longo da tabela.

Utilizando-se as referências e atendendo aos cálculos demonstrados, a linha 3 (L3) mostra um valor de 25% da energia consumida no Brasil destinada a uso em motores elétricos. Esta estimativa foi baseada em [92, 97].

Com base nos valores relativos às horas de operação de motores, apresentados por [92] e [103], observou-se que, tipicamente, motores de potência mais elevada operam por um número de horas maior que aqueles de menor potência. O estudo do caso americano apresentou o valor de 7.256 horas de operação por ano. Em [92], as

estimativas mostram que motores de 100 cv podem operar por até 7.227 horas por ano, no Brasil. Assim, optou-se por manter o mesmo valor apresentado para o estudo norte-americano. Procedimento análogo foi adotado para o cálculo do fator de carga dos motores, na linha 7.

Com os dados levantados, a energia média para cada motor foi calculada (razão entre a energia total e o número de motores), e dividida pelo número de horas de operação anual (linha 4), chegando-se a um valor médio de 494 kW, que é combinado ao fator de carga, para obtenção do valor de potência nominal média para os motores (linha 1 – 748 kW).

A partir da linha 8 são apresentadas as perdas que podem ser mitigadas em um motor convencional, quando substituído por um motor HTS. Estes dados são apresentados entre as linhas 9 e 13. Os valores aqui utilizados foram baseados em [14]. Durante o levantamento realizado no capítulo 2, onde foram estudados os motores HTS e seus protótipos, as referências, mesmo as mais atuais, não apresentaram protótipos com desempenho diferenciado em relação ao discutido para o caso norte-americano. É importante considerar também que estes dados levam em conta um valor de motor médio. Uma análise por motores de potências diferentes leva a resultados distintos para cada um deles, mas que estão fora do escopo deste modelo.

Inicialmente, considera-se que toda perda por efeito Joule pode ser eliminada. Esta é estimada em 0,61% de toda energia que entra no motor (linha 11). Entretanto, além da eliminação da perda por efeito Joule, também haverá redução nas perdas mecânicas: o motor é mais leve e sofre menos com perdas por atrito [3]. Estas respondem por 0,28% e estão na linha 10. Haverá ainda redução de perdas no ferro, estimadas em 0,51% (linha 9). A soma destas 3 categorias leva ao valor de 1,4% (linha 12) e o valor, em unidades de energia, MWh/motor/ano, é calculado a partir do produto entre a linha 5 (energia média anual por motor) e a linha 12 (total mitigável).

Esta vantagem, do ponto de vista de ganho de eficiência, do motor HTS em relação ao convencional, é um ganho “bruto”, ou seja, na verdade, o motor HTS traz consigo as perdas criogênicas, que deverão ser descontadas. Estas perdas estão detalhadas nas linhas de 15 a 21. Os valores apresentados no estudo norte-americano também estão citados em outras referências [98, 99].

Inicialmente, na linha 15, é apresentado o valor de perda fixa, que independe do carregamento do motor. O valor apresentado por [14], de 48 W, é aplicável a um motor de 865 kW. Como no caso brasileiro foi calculado um motor médio de 748 W, optou-se

por um valor de perdas de 41 W. Além deste valor, há também perdas proporcionais ao uso do motor, ou seja, quanto maior a corrente pelos seus enrolamentos, quanto maior seu carregamento, maiores serão estas perdas proporcionais. Foi adotado o valor de 0,03W/kW [14]. Com os valores adotados,  $[(41 \times 7,256) + (0,03 \times 3.588)] \times 12/1000 = 3,6$  MWh/motor/ano, sendo o valor de 7.256 o número de horas de operação estimado do motor. O estudo de caso norte-americano tratou estas horas como todas as horas do ano, ou seja, 8.760 h [14]. Para o caso brasileiro, optou-se por estimativa diferente, de acordo com o número de horas de operação do motor.

Esta energia deverá ser removida pelo sistema de criogenia. A temperatura de operação admitida é de 70 K (linha 17). A potência específica, SP (linha 18) indica quantos Watt são necessários para remover 1 W de calor. Este valor estimado considera que a eficiência de Carnot do sistema pode atingir 30% de eficiência [14]. Deve-se observar que este valor, de 12 W para a potência específica, eleva-se a uma taxa superior a linearidade, quando da redução da temperatura de operação, de 70 K para 30 K, o que dificulta o uso de fio supercondutor de primeira geração, salvo se houverem grandes progressos em sistemas criogênicos.

A energia gasta anualmente em criogenia é de 5,6 MWh/motor/ano, calculada através do procedimento mostrado na linha 20, e destinada a remover o calor gerado na operação. A linha 21 mostra o valor de pico, considerando-se que o valor da linha 20 é uma média de todo o ano.

A economia de energia líquida será aquela apresentada na linha 23, que já desconta a energia necessária ao funcionamento do sistema de criogenia. Sendo a tarifa de energia elétrica considerada elevada no Brasil, [100, 101] o valor da linha 25 é mais elevado que aquele obtido para o mercado norte-americano, levando a economia por motor a cada ano a valores mais elevados (linhas 26 e 28). O custo adotado para o sistema de criogenia foi aquele apresentado por [14] (linha 34).

Alguns dados foram obtidos junto a revendedores de motores (linhas 27 e 37), e representam valores médios, que não devem ser tomados como tendo grande exatidão, especialmente aquele que representa a vida útil do motor.

Baseado no estudo de caso norte-americano, optou-se por adotar a mesma taxa de desconto (10% - linha 29) e a quantidade de fio necessário, por motor (linha 32). A melhoria da tecnologia pode reduzir este valor, o que é um potencial fator de incerteza no modelo. Aqui, considera-se o fio como tendo uma secção de 1 mm<sup>2</sup>.

Ao final dos cálculos, a análise do motor “médio”, com vida útil de 30 anos, informa que há possibilidade de economia de \$ 47.167,17 (linha 35) por motor, adotando-se a vida útil de 30 anos e uma taxa de desconto de 10%. Este é um resultado muito mais otimista que aquele obtido na simulação do caso norte-americano. Este resultado, em parte, pode ser atribuído aos valores das tarifas de energia elétrica no Brasil. De acordo com alguns estudos [14, 100, 101], a tarifa brasileira pode chegar a 4 vezes o valor da tarifa nos EUA, o que em 30 anos de acúmulo, leva a custos evitados mais altos.

Apesar disso, estimativas de longo prazo sempre apresentam um grau de incerteza elevado, e os estudos citados [100, 101] afirmam que, para que o desenvolvimento industrial brasileiro possa manter-se, há necessidade de tratar a questão tarifária, de modo que a indústria possa ter acesso a custos de eletricidade reduzidos, o que influenciaria consideravelmente os resultados aqui obtidos, ao longo do tempo.

#### **4.2.7. Comparativo de Geradores**

O comparativo para geradores segue a mesma linha daquela adotada para o caso dos motores, considerando-se as similaridades entre as duas aplicações. A tabela e a metodologia empregadas no item anterior também são aplicáveis, porém, deve se observar a diferença de escala entre as potências de motores e geradores, sendo estes tipicamente maiores.

O parque brasileiro de geração é disponibilizado através do “Banco de Dados de Informações de Geração” ou BIG, disponível na página da Aneel [77, 80]. Através desta ferramenta, é possível identificar todos os empreendimentos de geração, que na consulta realizada neste trabalho, totalizavam 3.267 [80].

Entretanto, conforme discutido, a vantagem econômica da eliminação de perdas apresenta impactos maiores em potências mais altas. Deste modo, as informações para realização da comparação foram filtradas, e o escopo dos geradores, assim como em [14], foi limitado àqueles com potência acima de 100 MVA. Estando o escopo dos motores situado em motores com potência acima de 220 kW, trata-se aqui da análise de dispositivos com potência 450 vezes superior.

Os dados acerca dos empreendimentos de geração de energia elétrica no Brasil, presentes no BIG, foram exportados para uma planilha eletrônica, onde então foram

filtrados, para empreendimentos com potência acima de 100 MVA. Esta primeira etapa limitou os empreendimentos a um total de 254.

Apesar disto, os empreendimentos mostrados no BIG são apresentados apenas com sua potência total, não havendo um detalhamento acerca da combinação de geradores empregada. Por exemplo, a usina hidroelétrica de Itaipu, no lado brasileiro, conta com uma potência instalada de 7.000 MW, porém esta potência está distribuída em 10 geradores, de 700 MW cada [104].

Visando refinar os dados, foram realizadas pesquisas a respeito de cada um dos empreendimentos. Alguns deles, especialmente os de maior porte, possuem páginas internet própria, o que facilita a pesquisa. Outros possuem informações divulgadas por diferentes canais, como por exemplo, relatórios da Aneel, Wikipedia, página das empresas operadoras, entre outras fontes. Embora tenha sido uma pesquisa longa, esta acrescentou informações mais refinadas ao estudo. A partir das informações dos 254 empreendimentos, a pesquisa informou que estão instalados 377 geradores com potência igual ou superior a 100 MVA. A Tabela 4.13 apresenta o inventário destes geradores.

**Tabela 4.13.** Geradores brasileiros com potência igual ou superior a 100 MVA.

<b>Nome da Usina</b>	<b>Potência (MVA)</b>	<b>Detalhamento (MVA)</b>
Água Vermelha	1.396	6x232,700
Aimorés	330	3x110
Angra I	640	2x320
Angra II	1.350	4x337,5
Cana Brava	450	3x150
Capivara	619	4x155
Chavantes	414	4x103,5
Corumbá I	375	3x125
Estreito	1.050	6x175
Governador Bento Munhoz da Rocha Neto	1.676	4x419
Furnas	1.216	8x150
Aureliano Chaves	226	1x150 + 1x76
Igarapé	131	1x125

Ilha Solteira	3.444	20x172,2
Irapé	360	3x140
Ita	1.450	5x290
Itaipu (Brasil)	7.000	10x700
Luiz Gonzaga	1.479	6x246,6
Itapebi	450	3x150
Itumbiara	2.082	6x350
Jaguará	424	4x106
Jupia	1.551,2	14x110,8
Luís Eduardo Magalhães	902,5	5x190
Machadinho	1.140	3x380
Marimbondo	1.440	8x180
Miranda	408	3x136
Apolônio Sales	400	4x100
Norte Fluminense	868,925	4x210
Nova Avanhandava	347,4	3x115
Nova Ponte	510	3x170
Passo Fundo	220	2x110
Piratininga	470	2x100 + 2x136
Porto Primavera (Eng <sup>o</sup> Sérgio Motta)	1.540	14x110
Presidente Médici A, B	446	2x63 + 2x160
Governador José Richa (Salto Caxias)	1.240	4x310
Salto Osório	1.078	6x180
Salto Santiago	1.420	4x355
São Simão	1.710	6x285
Governador Ney Aminthas de Barros Braga	1.260	4x315
Serra da Mesa	1.275	3x425
Sobradinho	1.050,3	6x175
Taquaruçu (Escola Politécnica)	525	5x105
Três Irmãos	807,5	5x161,5
Tucuruí I e II	8.370	12x350 + 11x375
Uruguaiana	639,9	3x215

Mauá	462,564	3x119,5
Cuiabá	529,200	3x176
Itaúba	500,400	4x128,1
Paulo Afonso III	794,2	4X200
Paulo Afonso IV	2.462,4	6X410,4
Xingo	3.162	6x527
CTE II	235,2	2x115
Jorge Lacerda III	262	2x161
Jorge Lacerda IV	363	1x363
Emborcação	1.192	4x298
Santa Cruz	1.000	4x250
Campos Novos	880	3x294
Barra Grande	690	3x230
Araucária	484,15	3x160
Sepetiba	1.377	4x350
Governador Leonel Brizola (Ex TermoRio)	1.058,3	3x350
Euzébio Rocha (Ex Cubatão - CCBS)	249,9	1x161 + 1x55
Termopernambuco	532,756	3x178
Sepé Tiaraju (Ex-Canoas)	248,573	1x160 + 1x88
Rômulo Almeida Unidade I	138,02	1x138
Jesus Soares Pereira (Ex - Vale do Açú)	322,967	2x165
Peixe Angical	452	3x175
Foz do Chapecó	855	4x214
Serra do Facão	210	2x105
Fortaleza	346,63	1x324
Santa Isabel	1.087	8x136
Estreito	1.087	8x136
CTSUL	650	2x325
Simplício	333,7	3x101,9
Mauá	361	3x120
Porto do Pecém I (Ex. MPX)	720,274	2x360
Candiota III	350	2x175
Escolha	337,56	1x337

Porto do Pecém II	360	1x360
Angra III	1.350	4x337,5
Cacimbaes	126,585	1x126
Maranhão IV (Ex. MC2 Joinville)	330	2x168
Maranhão V (Ex. MC2 João Neiva)	330	2x168
MC2 Pecém	350	1x360
Belo Monte	11.233,1	11x1000 + 6x40
Colíder	300	3x102,3
Teles Pires	1.819,8	6x303,3
<b>Total de Geradores</b>	<b>377</b>	
<b>Potência Total</b>	<b>95.581,2 MVA</b>	
<b>Potência Média</b>	<b>253,53 MVA</b>	

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com dados da Aneel [77].

Diferente do caso dos motores elétricos, onde apenas a energia total consumida pelos mesmos era conhecida, é possível através do BIG conhecer informações sobre energia gerada por cada um deles. Deste modo, é possível fazer o estudo análogo ao da tabela 11, de motores, com os geradores, porém, avaliando apenas um gerador. Este terá uma potência média, obtida através do estudo dos 377 geradores encontrados através do levantamento, e a energia gerada será considerada como apresentando um fator de capacidade de 60%, análogo ao fator de capacidade de operação do sistema brasileiro [80, 92, 105].

Uma dificuldade no comparativo a ser realizado no caso dos geradores diz respeito ao fato de que, não foram identificados, na literatura, protótipos de geradores com potência compatível com aquela identificada neste estudo. Assim, alguns dados foram obtidos através de aproximações. A Tabela 4.14 apresenta os resultados deste comparativo.

**Tabela 4.14.** Comparativo de gerador convencional x HTS

<b>Número da Linha</b>	<b>Dado</b>	<b>Valor</b>	<b>Referência</b>
1	Potência Média nominal (MVA)	250	Tabela 4.13

2	Número de geradores	1	[80], este trabalho
3	Energia gerada (GWh/ano)	1.533	[14, 92]
4	Horas de operação de cada gerador por ano (h)	8.760	[14, 80]
5	Energia média anual por gerador (MWh/gerador/ano)	1.533.000	L3/L2
6	Potência média utilizada por gerador (MW)	175	L5/L4
7	Fator de Carga	70%	[14, 92]
<b>8</b>	<b>PERDAS MITIGÁVEIS EM GERADORES CONVENCIONAIS</b>		
9	Perdas no Ferro Mitigadas	0,42%	[14]
10	Perdas mecânicas (atrito) Mitigadas	0,19%	[14]
11	Perdas Joule mitigáveis	0,53%	[14]
12	Total mitigável	1,14%	L9+L10+L11
13	Total Mitigável por ano (MWh/gerador/ano)	17.476,2	L5*L12
<b>14</b>	<b>PERDAS EM GERADORES HTS</b>		
15	Perdas Fixas (W/gerador)	13.940	[14]
16	Perdas por uso (W/kW)	0,009	[14]
17	Temperatura de operação (K)	70	[14, 98, 99]
18	Potência específica	12	[14, 98, 99]

	(SP)		
19	Eficiência Carnot	30%	[14, 98, 99]
20	Perda Anual em Criogenia (MWh/gerador/ano)	1.630	$(L15 * L4 / 1000 + L16 * L5) * L18 / 1000$
21	Perda Máxima (kW/gerador)	194,28	$(L15 + L16 * L1 * 1000) * L18 / 1000$
<b>22</b>	<b>COMPARATIVO DE PERDAS LÍQUIDAS EVITADAS</b>		
23	(MWh/gerador/ano)	15.846,2	L13-L20
24	(%)	1,03%	$(L23 / L5) * 100$
25	Custo médio da Energia em 2040 (\$/MWh)	140,00	Tabela 4.3, [100, 101]
26	Economia média (\$/gerador/ano)	2.218.468	L25*L23
27	Vida Útil Média de um gerador (anos)	30	[102]
28	Economia total (\$)	66.554.040	L26*L27
29	Taxa de desconto	7%	[14]
30	Valor Líquido Presente economizado (\$)	24.695.377	[14]
31	Custo do fio em 2040 (\$)	20,00	[14]
32	Fio necessário por gerador (km)	200	[14]
33	Custo do fio para cada gerador (\$)	4.000.000	$L31 * L32 * 1000$
34	Custo da Criogenia por gerador (\$)	836.569,70	$L21 * 4.306$ [14]
35	Economia por gerador (\$/gerador)	19.858.807,30	L30-L33-L34
36	Economia por kW	79,43	$L35 / (L1 * 1000)$

	(\$/kW)		
37	Custo do gerador convencional (\$)	60.000.000	[102]

**Fonte:** Elaborado pelo autor, a partir das referências apresentadas ao longo da tabela.

Partindo do levantamento de geradores realizado, o valor médio encontrado (linha 1) foi utilizado, e através de informações de outras referências [14, 80, 92] foram estimados e calculados os valores até a linha 8, conforme indicado.

A seguir, a partir da linha 8, novamente são apresentadas as perdas que podem ser mitigadas, porém, neste caso, a aplicação é de geradores. Estes dados são apresentados entre as linhas 9 e 13. O autor do estudo norte-americano obteve estes dados a partir de extrapolação, tomando como referência um protótipo de motor de 1000 hp (746 kW) construído pela Rockwell Automation [93].

Aqui, tratando-se de um gerador de 250 MVA, deve-se considerar, que, tipicamente, motores ou geradores maiores apresentam perdas numericamente maiores, porém percentualmente menores. Desta forma, a perda mitigada no ferro foi estimada em 0,42%, as perdas mecânicas mitigadas foram estimadas em 0,19% e as perdas Joule eliminadas foram de 0,53% (linhas 9, 10 e 11). O somatório destes valores e o cálculo percentual informa que a energia acumulada chega a 17.476,2 MWh/gerador/ano.

Novamente, como no caso dos motores, realizado na seção anterior, esta vantagem é “bruta”, e não leva em conta a perda acrescentada pelo gerador HTS em relação ao convencional, advinda da criogenia, e que deve ser descontada. Esta parcela é apresentada em detalhe entre as linhas 15 e 21.

Inicialmente, na linha 15, é apresentado o valor de perda fixa. Novamente, o valor do caso norte-americano [14], obtido a partir de um dado de teste de motor, foi ajustado, através de um fator de escala, e aplicado, obtendo-se aqui o valor de 13.940 W. Em seguida, há também o valor das perdas proporcionais ao uso, ou seja, quanto maior a corrente pelos enrolamentos, quanto maior seu carregamento, maiores serão estas perdas. Foi adotado o valor de 0,009 W/kW [14]. Com os valores adotados,  $[(13940 \times 8,76) + (0,009 \times 1.533.000)] \times 12/1000 = 1.630$  MWh/gerador/ano.

A temperatura de operação admitida é de 70 K (linha 17). A potência específica, SP (linha 18) indica quantos Watt são necessários para remover 1 W de calor. Este valor estimado considera que a eficiência de Carnot do sistema pode atingir 30% de eficiência [14]. Deve-se observar que este valor, de 12 W para a potência específica, eleva-se com

uma taxa acima de um crescimento linear, quando da redução da temperatura de operação, de 70 K para 30 K, o que dificulta o uso de fio supercondutor de primeira geração, salvo se houverem grandes progressos em sistemas criogênicos.

A energia gasta anualmente em criogenia é de 1.630 MWh/gerador/ano, calculada através do procedimento mostrado na linha 20, e destinada a remover o calor gerado na operação. A linha 21 mostra o valor de pico, considerando-se que o valor da linha 20 é uma média de todo o ano.

A economia de energia líquida será aquela apresentada na linha 23, que já desconta a energia necessária ao funcionamento do sistema de criogenia. Sendo a tarifa de energia elétrica considerada elevada no Brasil, [100, 101] o valor da linha 25 é mais elevado que aquele obtido para o mercado norte-americano, levando a economia por gerador a cada ano a valores mais elevados (linhas 26 e 28). O custo adotado para o sistema de criogenia foi aquele apresentado por [8] (linha 34).

Alguns dados foram obtidos junto a revendedores de motores/geradores (linhas 27 e 37), e representam valores médios, que não devem ser tomados como tendo grande exatidão, especialmente aquele que representa a vida útil do gerador.

Baseado no estudo de caso norte-americano, optou-se por adotar a mesma taxa de desconto (7% - linha 29) e a quantidade de fio necessário, por gerador (linha 32). A melhoria da tecnologia pode reduzir este valor, o que é um potencial fator de incerteza no modelo. Aqui, considera-se o fio como tendo uma secção de 1 mm<sup>2</sup>.

Ao final dos cálculos, a análise do gerador “médio”, com vida útil de 30 anos, informa que há possibilidade de economia de \$ 19.858.807,30 (linha 35) por gerador, adotando-se a vida útil de 30 anos e uma taxa de desconto de 7%. Este é um resultado muito mais otimista que aquele obtido na simulação do caso norte-americano. Este resultado, em parte, pode ser atribuído aos valores das tarifas de energia elétrica no Brasil. De acordo com alguns estudos [14, 100, 101], a tarifa brasileira pode chegar a 4 vezes o valor da tarifa nos EUA, o que em 30 anos de acúmulo, leva a custos evitados mais altos.

Apesar disso, estimativas de longo prazo sempre apresentam um grau de incerteza elevado, e os estudos citados [100, 101] afirmam que, para que o desenvolvimento industrial brasileiro possa manter-se, há necessidade de tratar a questão tarifária, de modo que a indústria possa ter acesso a custos de eletricidade reduzidos, o que influenciaria consideravelmente os resultados aqui obtidos, ao longo do tempo.

É importante comentar, que tanto no caso dos motores, como no caso dos geradores, o estudo parte de uma série de premissas, como por exemplo, a maturação da tecnologia, que podem vir a não se concretizar, bem como a evolução favorável dos custos. Os cenários obtidos, embora positivos, apresentam uma incerteza, que se torna menor conforme o cenário traçado possa ser ajustado ao longo do tempo.

#### **4.2.8. Comparativo de Transformadores**

O uso de transformadores supercondutores apresenta algumas vantagens técnicas em relação aos transformadores convencionais, porém, neste estudo, a comparação não captura vantagens técnicas, salvo se elas forem convertidas em vantagem financeira. Como principais vantagens técnicas, no caso do transformador, podem ser citados a não necessidade do uso de óleo, de difícil descarte, e ainda a possibilidade de fabricar o transformador com uma função de limitador de corrente supercondutor “embutida”. Assim como outras aplicações, os transformadores também apresentam uma densidade de potência elevada, menor volume, menor massa e facilidade de instalação quando comparados a transformadores tradicionais, devido à redução de massa.

No estudo do caso norte-americano, foi apresentada uma base de dados contendo informações sobre transformadores convencionais, organizados pela sua potência nominal (MVA). A tabela contava ainda com um inventário a respeito dos transformadores instalados, e suas respectivas potências. Deste modo, seguindo a lógica de obtenção de um “transformador médio” capaz de representar todo o sistema e ser inserido na planilha, foi possível no referido estudo [14] fazer uma média ponderada do parque de transformadores instalados.

O estudo dos dados sobre transformadores, disponível para o Brasil, leva ao aplicativo “Sistema de Informações Geográficas Cadastrais do SIN – SINDAT”, disponibilizado pelo ONS (operador nacional do sistema) [106]. O referido aplicativo disponibiliza informações relevantes do Sistema Interligado Nacional, integrando, em um mesmo ambiente, mapas digitais, formados por dados gráficos vetoriais, com dados alfanuméricos da Base de Dados Técnica do ONS (BDT) [107].

O aplicativo SINDAT, no seu menu inicial, oferece a opção de “Relatórios”, onde estão disponíveis um levantamento, de 2007, e os equipamentos novos, de instalação prevista para os anos seguintes. Consultando-se este documento, os dados acerca de transformadores, para o ano de 2007, são apresentados na Tabela 4.15.

**Tabela 4.15.** Capacidade de transformação (MVA) em 2007

Tensão (kV)	Rede Básica		Sistema de Transmissão	
	Potência	Nº de transformadores	Potência	Nº de transformadores
230	35.393	403	52.327	538
345	24.703	92	29.750	127
440	14.229	40	22.751	100
500	52.484	92	100.682	197
750	12.750	8	12.750	8
<b>TOTAL</b>	139.559	635	218.260	970

**Fonte:** Elaborado pelo autor, a partir de dados do aplicativo SINDAT, do ONS [106].

De acordo com o documento, sistema de Transmissão é definido como todos os equipamentos da Rede Básica, mais os equipamentos de conexão de usinas, distribuidoras e consumidores livres, com tensão primária igual ou maior que 230 kV. Assim, os dados do sistema de transmissão foram adotados, e a potência média dos transformadores instalados é de 225 MVA.

Para realizar a simulação deste estudo, cujo ano inicial é 2015, iniciou-se com os dados do ONS, também disponíveis no SINDAT, de novas instalações até 2011, como mostra a Tabela 4.16.

**Tabela 4.16.** Novas instalações de transformadores.

Ano	Transformadores Instalados	Potência Instalada (MVA)	Potência Média do Transformador (MVA)
2008	51	9.256,33	182
2009	38	8.717	230
2010	37	7.946	215
2011	56	10.758	193
<b>MÉDIAS</b>	46	9.169	205

**Fonte:** Elaborado pelo autor, a partir de dados do aplicativo SINDAT, do ONS [106].

Com a evolução das instalações, o cenário, ao começo de 2012, é de uma capacidade de transformação de 254.936 MVA e um total de 1154 transformadores. Avaliando-se o plano de ampliações e reforços 2012-2014, do ONS [108], está previsto um aumento de 23.245 MVA e 97 novas unidades transformadoras. Desta forma, a situação, no início do ano de 2015, será de 278.181 MVA e 1.251 transformadores, levando a uma média de 222,37 MVA por transformador, e neste caso, optando-se por adotar o valor de 225 MVA.

O comparativo entre um transformador convencional, e um transformador supercondutor, vem apresentado na Tabela 4.17.

**Tabela 4.17.** Comparativo de transformador convencional x HTS.

<b>Número da Linha</b>	<b>Dado</b>	<b>Valor</b>	<b>Referência</b>
1	Potência Média nominal (MVA)	225	[106, 108], este estudo.
2	Número de transformadores	1	[14], este estudo
3	Energia transformada (GWh/ano)	1.533	Tabela 4.13
4	Horas de operação de cada transformador por ano (h)	8.760	[14, 80]
5	Energia média anual por transformador (MWh/transformador/ano)	1.533.000	L3/L2
6	Potência média utilizada por transformador (MW)	175	L5/L4
7	Fator de Carga	80%	L6/L1
<b>8</b>	<b>PERDAS MITIGÁVEIS EM TRANSFORMADORES CONVENCIONAIS</b>		
9	Perdas no Ferro Mitigáveis	0,0875%	[14], L7
10	Perdas mecânicas (atrito) Mitigadas	0%	[14]

11	Perdas no cobre mitigáveis	0,25%	[14], L7
12	Total mitigável	0,3375%	L9+L10+L11
13	Total Mitigável por ano (MWh/transformador/ano)	5.173,88	L5*L12
<b>14</b>	<b>PERDAS EM TRANSFORMADORES HTS</b>		
15	Perdas Fixas (W/transformador)	6.970	[14]
16	Perdas por uso (W/kW)	0,004	[14]
17	Temperatura de operação (K)	70	[14, 98, 99]
18	Potência específica (SP)	11	[14, 98, 99]
19	Eficiência Carnot	30%	[14, 98, 99]
20	Perda Anual em Criogenia (MWh/transformador/ano)	740	$(L15*L4/1000+L16*L5)*L18/1000$
21	Perda Máxima (kW/transformador)	86,57	$(L15+L16*L1*1000)*L18/1000$
<b>22</b>	<b>COMPARATIVO DE PERDAS LÍQUIDAS EVITADAS</b>		
23	(MWh/transformador/ano)	4.433,88	L13-L20
24	(%)	0,29%	$(L23/L5)*100$
25	Custo médio da Energia em 2040 (\$/MWh)	140,00	Tabela 4.3, [100, 101]
26	Economia média (\$/transformador/ano)	179.536,7 1	L25*L23
27	Vida Útil Média de um transformador (anos)	40	[14]
28	Economia total (\$)	7.181.468, 38	L26*L27
29	Taxa de desconto	7%	[14]
30	Valor Líquido Presente economizado (\$)	2.664.737, 7	[14]
31	Custo do fio em 2040 (\$)	20,00	[14]
32	Fio necessário por	250	[14]

	transformador (km)		
33	Custo do fio para cada transformador (\$)	5.000.000	L31*L32*1000
34	Custo da Criogenia por transformador (\$)	372.770,4 2	L21*4.306
35	Economia por transformador (\$/transformador)	2.286.967, 28	L30-L33-L34
36	Economia por kW (\$/kW)	10,16	L35/(L1*1000)
37	Custo do transformador convencional (\$)	4.000.000	[109]

**Fonte:** Elaborado pelo autor, a partir das referências apresentadas ao longo da tabela.

Adotando-se os valores detalhados na Tabela 4.17, resultou numa potência média de 175 MVA por transformador, e um fator de relação com o valor médio calculado de 0,78.

Como referências para as perdas, foram adotadas a norma ABNT NBR 5356 e o levantamento realizado em [14], que levou em consideração um inventário dos transformadores do sistema norte-americano. Para estimar as perdas, deve-se observar que elas serão divididas pelo fator de carga típico, de 0,8.

De posse destas informações, o total mitigável por ano ficou em 5.173,88 MWh/transformador/ano, valor ainda bruto, ou seja, devem-se ainda descontar as perdas criogênicas. Pode-se observar que, no caso dos transformadores, há um potencial de mitigação de perdas menor. Tipicamente, são dispositivos com eficiência alta, estando tipicamente acima de 95% (a plena carga), podendo atingir valores superiores a 99%, no caso de transformadores de potência elevada (acima de 350 MVA) [14, 81, 99].

Apesar da alta eficiência, comum em transformadores maiores, as perdas, que se tornam mais relevantes em potências menores, do ponto de vista percentual, acabam não sendo corretamente capturadas por esta modelagem, baseada em um tamanho médio do dispositivo (225 MVA, no caso do transformador). O método apresentado por [14] é mais adequado, porém, depende de dados não disponíveis para o sistema elétrico brasileiro [106].

Seguindo o sistema análogo ao das aplicações anteriores (motores e geradores), são estimadas as perdas criogênicas para os transformadores, devendo ser observada a

potência específica ligeiramente menor que a de motores e geradores (linha 18). Esta potência específica menor é justificada pela ausência de partes móveis. A linha 10, utilizada para assinalar as perdas mecânicas que podem ser eliminadas, foi ajustada em 0%, e foi mantida na tabela apenas para que o formato original, estabelecido na aplicação de motores, fosse mantido.

O total de perdas mitigáveis (linha 12) ficou em 0,3375%, valor mais modesto que o apresentado nas aplicações anteriores. Porém, devem ser observados a diferença na questão do detalhamento do parque de transformadores, já citada, que acrescenta incerteza elevada a este valor, bem como o fato do estudo envolver apenas transformadores de geração e transmissão, excluindo-se, por enquanto, o parque de distribuição.

A exclusão do parque de distribuição, embora economicamente justificável, apresenta um aspecto prático não capturável pelo estudo: a possibilidade de transformadores menores, visando desobstruir o congestionamento urbano de cabos e transformadores.

As perdas nos transformadores HTS, indicadas entre as linhas 15 e 21, foram referenciadas ao estudo de caso norte-americano [14]. Outras referências, citadas no capítulo 2, embora detalhassem a construção de protótipos, não apresentavam detalhes acerca das perdas. Assim, a perda anual, no transformador médio, ficou em 740 MWh/transformador/ano. Com relação ao fio necessário para construção de um transformador, foi empregado o valor de 250 km (linha 32). Aqui, considera-se o fio como tendo uma secção de 1 mm<sup>2</sup>.

Comparando-se as perdas brutas, com as perdas criogênicas, chega-se as perdas líquidas, estimadas em 4.433,88 MWh/transformador/ano, ou 0,29%. O custo evitado fica em \$10,16 por kW. Porém, dos valores calculados até aqui, para motores, geradores e transformadores, este é considerado o de maior incerteza, devido às limitações da modelagem por valor médio. Outro fator que pode limitar este resultado é o fato de que a energia é gerada uma vez, e transmitida/consumida apenas uma vez. Porém, ela é transformada mais de uma vez no sistema, e sujeita a fatores de carga diferentes, que poderiam influenciar o resultado, talvez para cima ou talvez para baixo.

Os resultados obtidos para transformadores sugerem que, eventualmente, um estudo mais detalhado acerca do parque de transformadores, visando capturar mais adequadamente o valor médio (não apenas por média aritmética, porém ponderada) possa levar a resultados mais promissores. Estudo sobre perdas técnicas em parques de

distribuição são comuns [71, 72, 73, 74], porém, no escopo desta abordagem, não foi considerada viável a substituição de transformadores de distribuição.

#### **4.2.9. Comparativo de Cabos**

A comparação de sistemas de transmissão envolvendo supercondutividade não é simples, e apresenta como grande fonte de incerteza a baixa quantidade de sistemas de transmissão comerciais já instalados e em funcionamento. O principal sistema de cabos, em funcionamento, atualmente, está localizado em Long Island [85].

Visando realizar o comparativo entre o cabo convencional, e o supercondutor, devem-se levar em conta os limites entre os sistemas de transmissão e de distribuição. Há possibilidade de considerar, durante a análise, ambos os sistemas.

No caso de sistemas de distribuição, é reconhecida a possibilidade de uso de cabos supercondutores, que teria como benefício uma redução do congestionamento urbano, já que, utilizando o mesmo espaço, o sistema com material HTS poderia conduzir maiores blocos de energia. Porém, como o modelo aqui estudado trabalha apenas com aspectos financeiros, e não com vantagens técnicas, os sistemas de distribuição não são considerados para análise. O ganho maior, que é técnico, teria de ser de alguma forma representado através de economia financeira, ou seja, alguma espécie de “bonificação” no custo. O ganho técnico teria de ser precificado.

Tipicamente, sistemas de transmissão iniciam-se com um transformador elevador, logo após o gerador, com tensões no secundário que variam desde 230 kV até 765 kV. São linhas de transmissão longas, onde a elevada tensão tem como objetivo minimizar perdas. No estudo de caso norte-americano, devido a esta redução de perdas, já obtida com a elevada tensão, e ainda ao elevado custo de criogenia necessário a linhas muito longas, estas também não foram incluídas no escopo da análise [14].

Após este estágio, tipicamente, há presença de uma subestação, e no caso do Brasil, há diminuição da tensão para 69 kV e 138 kV. Estas são as linhas consideradas para análise de perdas, fazendo assim analogia com o escopo do estudo norte-americano.

Tipicamente, na construção de linhas de transmissão, são utilizados condutores de alumínio, devido especialmente aos fatores peso, custo, e ainda, por apresentarem diâmetro maior que o equivalente em cobre, o que acarreta em menor tendência ao efeito corona [110].

Os tipos de cabo mais comuns são os do tipo CA (condutor de alumínio) e CAA (condutor de alumínio com alma de aço). Tipicamente, os nomes códigos dos cabos CA são nomes de flores (por exemplo, 4 AWG Rose) e para os cabos CAA, nomes de aves (por exemplo, 1590 Falcon).

Considerando-se os valores típicos apresentados em [14], as perdas, para linhas de transmissão de 69 kV e 138 kV foram estimadas, como apresenta a Tabela 4.18.

A estimativa foi baseada na escolha de seis tipos de cabos, empregados em transmissão, de modo análogo àquele realizado em [14]. No caso norte-americano, devido ao uso de valores de tensão diferenciados, o autor optou por 8 cabos diferentes. A numeração dos cabos e suas características de resistência e corrente (primeira, segunda e terceira coluna) foram obtidos a partir de catálogos de fabricantes [63]. Devido ao modelo de simulação operar com milhas, este padrão foi mantido no cálculo. A quarta coluna mostra o cálculo das perdas na situação de pico, ou seja, quando da condução da máxima corrente no referido cabo.

Durante a operação de um sistema de transmissão, este não trabalha com carregamento máximo durante todo o tempo, de modo que, para o cálculo de valores médios, é necessário corrigir o valor através de uma curva de carga. Utilizando valores típicos [14], esta correção é obtida através do fator 0,3636, que foi discutido anteriormente, e representa a integral da curva de carregamento normalizada ao quadrado.

Após o cálculo das perdas, os cabos são distribuídos com diferentes valores de tensão, e supondo um fator de potência de 0,9. Com estes valores, calcula-se a potência total, através do produto entre tensão, corrente, fator de potência e a raiz quadrada de 3.

Utilizando-se a mesma metodologia da seção onde foram calculadas as perdas, a energia transmitida em um ano é obtida multiplicando-se o resultado da oitava coluna (potência) pelo total de horas (8.760) e o fator 0,55 devido à curva de carga.

O valor percentual de perdas de pico, por milha, vem da comparação entre a potência total (oitava coluna) e o pico de perdas (quarta coluna), enquanto a comparação das perdas médias (quinta coluna) com a energia total (nona coluna) leva ao percentual de perdas médias em energia por milha.

Para realizar a comparação do cabo convencional com o análogo HTS, o mesmo cálculo, tabular, é realizado para um cabo HTS, hipotético, capaz de carregar 2.000 A [8]. A tensão adotada será de 138 kV, e o mesmo fator de potência (0,9). A potência na situação de pico será  $2 \text{ kA} \times 138 \text{ kV} \times 0,9 = 430,22 \text{ MW}$ . Para a energia total,

realizando o cálculo descrito anteriormente, para o sistema convencional, os parâmetros do sistema supercondutor levam ao resultado de 2.303 GWh.

**Tabela 4.18.** Perdas típicas em cabos.

<b>Cabo (CAA)</b>	<b>Resistência (Ohms/milha)</b>	<b>Corrente nominal(A)</b>	<b>Perdas Pico (kW/milha)</b>	<b>Perdas Médias (kW/milha)</b>	<b>Tensão (kV)</b>	<b>Fator de Potência</b>	<b>Potência Total (MW)</b>	<b>Energia Total (GWh)</b>	<b>Perdas Pico por milha (%)</b>	<b>Perdas médias em energia por milha (%)</b>	<b>Relação de perdas percentuais entre HTS e cabo tradicional</b>
954	0,0982	1010	300,5	109,3	138	0,9	218	1117	0,137	0,086	0,430
795	0,117	900	284,3	103,4	138	0,9	194	1036	0,147	0,087	0,425
636	0,147	780	268,3	97,6	138	0,9	168	900	0,160	0,095	0,389
477	0,196	670	264	96,0	69	0,9	72	386	0,366	0,218	0,169
336,4	0,278	530	234,3	85,2	69	0,9	57	305	0,411	0,245	0,151
266,8	0,350	460	222,2	80,8	69	0,9	49	265	0,449	0,267	0,138

**Fonte:** Elaborado pelo autor, a partir das referências [14,63].

Para perdas criogênicas, foram adotados os valores propostos por [8]. As perdas são definidas como perdas variáveis (ou perdas AC), esta sendo ajustada para 1 W/m/fase, perdas por “vazamento de calor” através do isolamento, também definidas em 1 W/m/fase, e ainda as perdas nas terminações do cabo, definidas como 670 W/fase.

A partir dos valores de perdas, deve-se observar que aplica-se o mesmo raciocínio da utilização do sistema, ou seja, o sistema não trabalha em sua corrente e potência nominais durante todo o tempo. Para o caso das perdas variáveis, estas variam com um fator de 0,25, pois são dependentes do cubo da corrente. Assim, o valor de 4,8 kW/milha fica reduzido a 1,2 kW/milha. As perdas por vazamento de calor não sofrem esta influência, e permanecem com o valor estabelecido, convertido de metros para milhas leva ao valor de 4,8kW/milha. As perdas nas terminações do cabo são estimadas

em 2kW/milha na situação de pico, sendo este valor reduzido a 1,8 kW/milha devido a influência do carregamento, que é considerada pequena [14].

Todas as perdas no cabo supercondutor aparecem como calor, e deverão ser removidas através do sistema de criogenia. Admitindo-se os avanços de criogenia, descritos anteriormente, admite-se que cada 1 W demandará o consumo, em refrigeração, de 11 W. As perdas citadas no parágrafo anterior, combinadas (7,8 kW), e multiplicadas por este valor (11 W) resultam em 85,8 kW/milha de perdas.

Na situação de pico, o valor de perdas chega a 11,7 kW, levando a perdas da ordem de 128,7 kW/milha; dividindo-se este valor por 430,22 MW, resulta em perdas da ordem de 0,030% por milha. Comparando-se o valor de 85,8 kW, que se refere ao funcionamento médio, ao total de energia por ano, de 2.303 GWh, o resultado é 0,037% por milha. Estes dois valores, em porcentagem, preencheriam a décima e décima primeira coluna, para o caso supercondutor.

Utilizando-se o valor de perdas anuais percentuais, obtém-se a última coluna da tabela, “Relação de perdas percentuais entre HTS e cabo tradicional”. Cada linha é calculada como o valor obtido para o sistema supercondutor (0,037) dividido pelo valor da décima primeira coluna, da linha correspondente. Por exemplo, para o cabo 477, o valor da última coluna será  $0,037/0,218 = 0,169$ . Quanto maior for este valor, menor é a vantagem do sistema supercondutor. Em um caso extremo e hipotético, se esta relação tornar-se maior que 1, o cabo supercondutor apresentaria desvantagem em relação ao sistema tradicional.

Referindo-se ao estudo do sistema elétrico realizado, para levantamento de perdas, observa-se que 1,93% da energia é considerada recuperável. Porém, este é um valor bruto, e a relação calculada na última coluna da Tabela 4.5 desta seção informa o quanto poderá ser capturado, já que relaciona a economia de um cabo convencional com relação a um cabo supercondutor, considerando as perdas criogênicas. O valor médio calculado aqui, na última coluna, fica em 0,283. Para recuperação máxima (1,93%) este valor deveria ser zero. Como não é o caso, o aproveitamento fica  $1,93 \times (1 - 0,283) = 1,39\%$ , valor empregado na simulação.

## 4.3. Detalhamento do Modelo e Principais Resultados

Após a realização das comparações e levantamento de dados, o conjunto de informações obtidos foi transportado para a planilha, que por sua vez foi adaptada para realizar a simulação para um período de 25 anos, para o caso Brasil.

Devido ao tamanho da planilha, optou-se por apresentar a parametrização gradativamente, não tratando toda a pasta de trabalho de uma só vez, mas apresentando partes. Quando do desenvolvimento do modelo original, da planilha, não houve preocupação com gerar a mesma com um formato que simplificasse a impressão, e, desta forma, sua versão completa pode ocupar mais de 40 páginas, o que não permite sua apresentação ou impressão nesta tese.

A pasta de trabalho é composta por 4 planilhas, a saber:

- ***Assumptions***, onde se realiza a parametrização básica, e onde é inserida a maior parte dos dados obtidos através das análises conduzidas até agora. A maior parte das mudanças nas premissas de simulação é realizada nesta planilha.
- ***Database***, que envolve alguns cálculos intermediários, derivados da planilha *Assumptions*, e ainda envolve ligação tipo realimentação com a planilha *Results*, para análise da redução de preços da criogenia. Esta planilha também apresenta dados que evoluem ao longo dos anos, como por exemplo, tarifas de energia elétrica.
- ***Results***, que concentra os cálculos finais e os dados consolidados obtidos para o cenário estabelecido.
- ***Graphs***, que apresenta gráficos para os dados obtidos em diferentes pontos das outras três planilhas. Seus resultados estarão distribuídos ao longo do estudo, não sendo tratados separadamente.

A nomenclatura original, em inglês, foi mantida, de modo a facilitar a utilização da mesma. A mudança destes nomes implicaria em alterar todas as referências das planilhas que utilizassem o nome, e entende-se que estes nomes são irrelevantes para o resultado final.

Como resultado dos comparativos para as quatro aplicações, foram obtidos o percentual líquido de energia economizada, por dispositivo. Estes resultados são inseridos no modelo, na planilha *Assumptions*, nas células C11 até C14, como mostra a Figura 4.5.

Na mesma planilha, ao lado, nas colunas de “D” até “H”, e ainda nas linhas de 11 até 14, são inseridos os parâmetros relativos à penetração de mercado estimada para cada aplicação: o ano inicial; o ano “t”, onde uma determinada porcentagem é atingida; a porcentagem atingida no ano “t”; o número de anos até que a aplicação atinja 50% do mercado máximo estimado e o mercado máximo que a aplicação pode capturar. Tais informações são mostradas na Figura 4.6.

Na coluna I, nas linhas de 11 a 14, é especificada a quantidade de fios HTS, em km, necessários a construção dos dispositivos, pela ordem motor (linha 11), gerador (linha 12), transformador (linha 13) e cabo (linha 14). A coluna J, nas mesmas linhas (11 a 14), especifica o tamanho básico do dispositivo que pode ser fabricado com a quantidade de fio mostrada na coluna I. Optou-se por adotar os mesmos valores definidos por [8], e esta parte não sofreu alterações, embora outras metodologias, como [48] pudessem ser aplicadas. Esta parametrização tem influência, principalmente, na demanda de fio estimada para o futuro.

As linhas 7 e 8 das colunas J e K trazem o modelo de melhoria técnica dos fios HTS. O modelo proposto por [14] prevê um crescimento linear da condução de corrente, iniciando-se em 100 A, no ano 2000, e chegando a 1000 A, no ano de 2015. Avaliando-se esta perspectiva nos dias atuais, ela revelou-se otimista. Os fios HTS ainda não atingiram a capacidade de corrente estimada.

Como citado anteriormente, optou-se por adotar modelo similar ao de [14], porém, considerando-se o cenário atual [112], a perspectiva de aperfeiçoamento técnico dos fios foi deslocada no tempo, prevendo-se o crescimento linear da capacidade de condução, porém, iniciando com o valor de 100 A em 2015, porém, atingindo o valor de 1000 A em 2030. A parametrização é mostrada nas células das colunas J e K, linhas 7 e 8, como mostra a Figura 4.7.

O aumento da capacidade de condução de corrente, linear, que na modelagem é realizado de forma linear, é apresentado como gráfico, na Figura 4.8. A capacidade de corrente inicial é de 100 A, evoluindo, linearmente, até 1000 A.

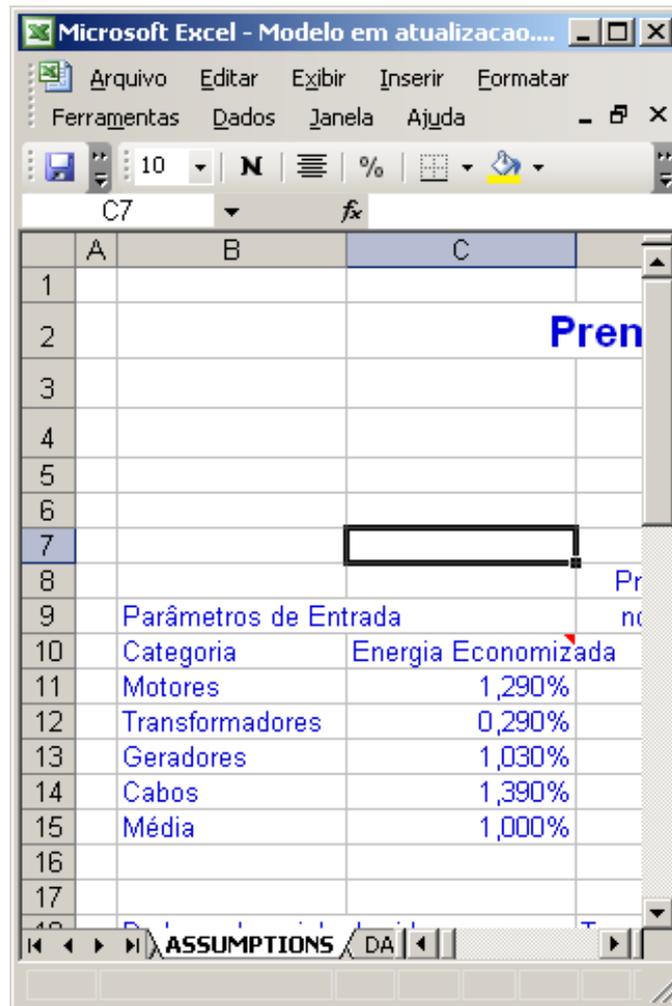


Figura 4.5: Parametrização da energia economizada, em %. Fonte: Elaborado pelo autor.

8		Ano Inicial	Ano "t"	Percentual no ano "t" %	Anos até 50% da penetração	Fração Máxima Mercado (%)	
9	Parâmetros de Entrada						
10	Categoria	Energia Economizada					
11	Motores	1,290%	2026	2032	0,10	15	60
12	Transformadores	0,290%	2030	2033	0,25	20	70
13	Geradores	1,030%	2023	2032	0,30	22	60
14	Cabos	1,390%	2022	2030	0,20	18	50
15	Média	1,000%					

Figura 4.6: Parâmetros da curva "S". Fonte: Elaborado pelo autor.

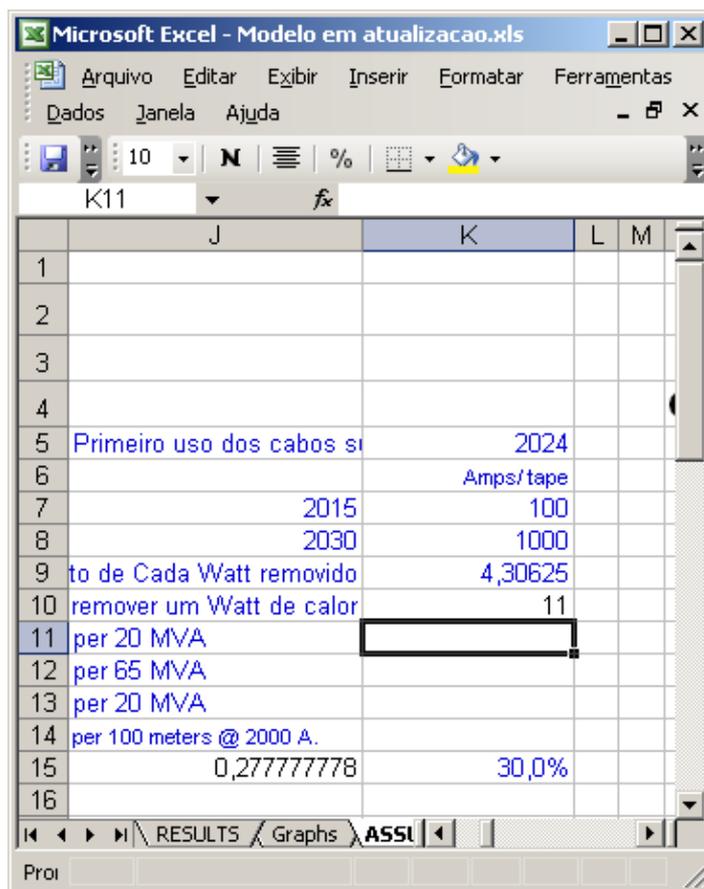


Figura 4.7: Evolução dos fios. Fonte: Elaborado pelo autor.

### Desempenho dos fios HTS - A/mm<sup>2</sup>

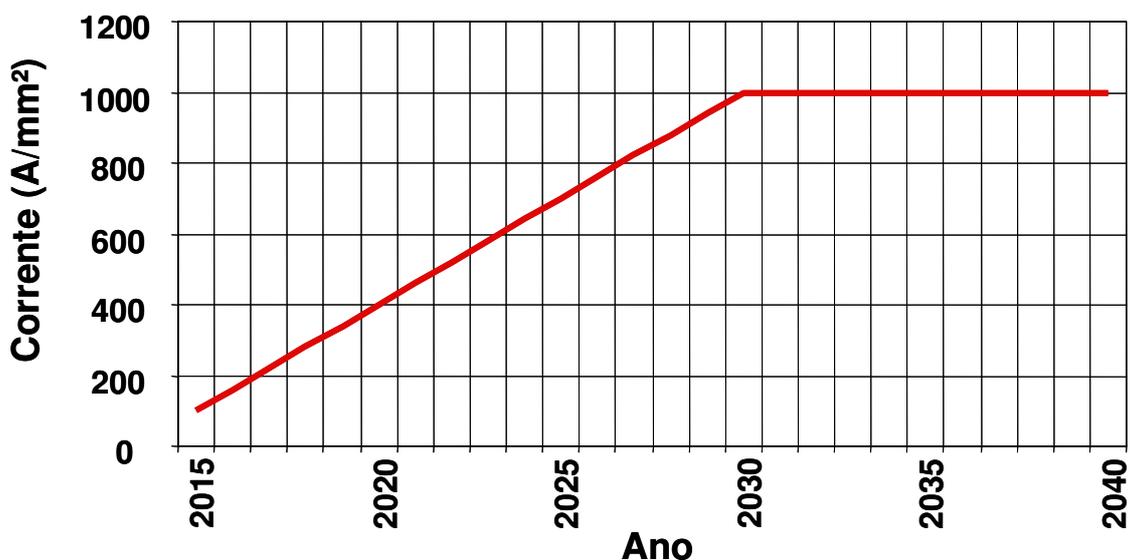
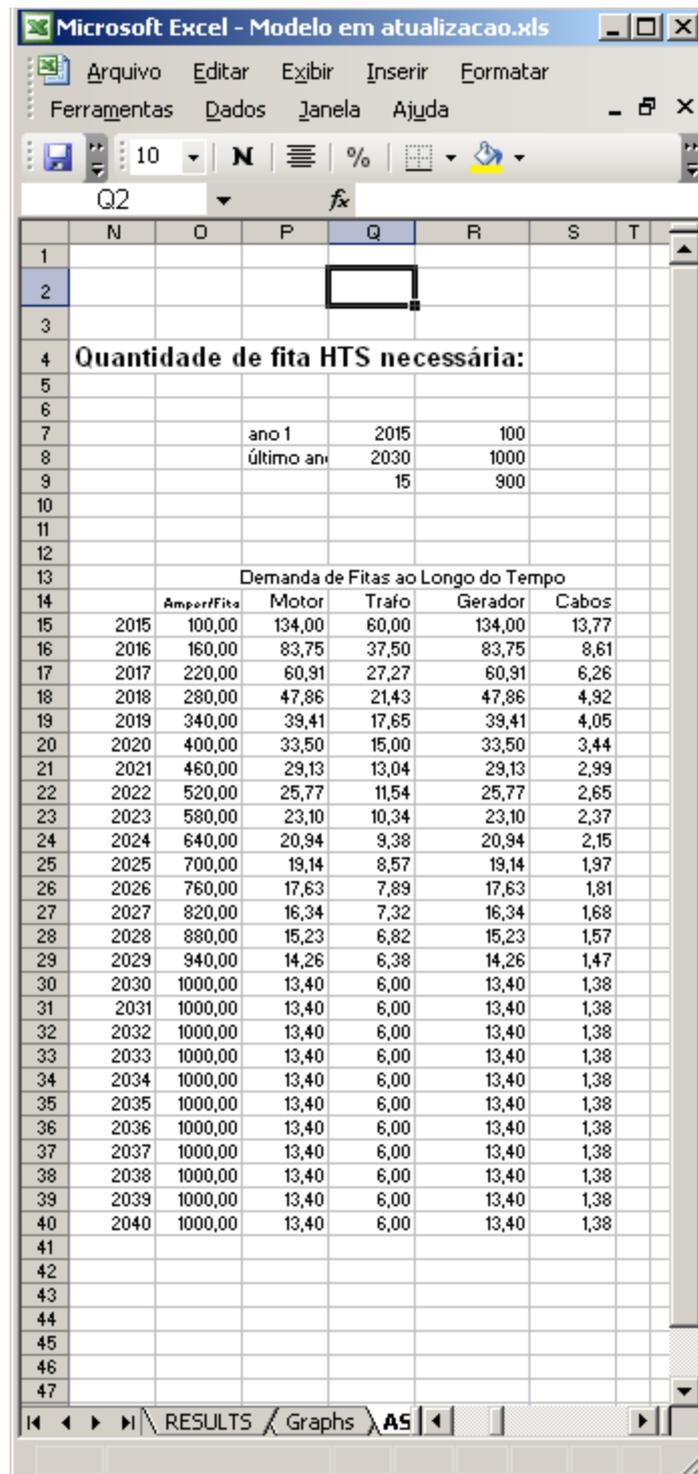


Figura 4.8: Desempenho dos fios HTS. Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo linear, adotado para modelar a evolução da capacidade de condução de corrente dos fios supercondutores, é simplificado, e acrescenta alguma incerteza aos resultados. Entretanto, utilizando-se o recurso do Excel, de “auditoria de fórmulas”, é possível identificar as fórmulas e a série numérica que são geradas através do modelo. Basta realizar a substituição das mesmas. Elas estão situadas na coluna O, das linhas 15 a 40, como ilustra a Figura 4.9. As colunas adjacentes mostram que, com a evolução dos fios, a quantidade necessária para construção dos dispositivos decresce. Pode-se observar, na linha 15, os valores iniciais estimados, que são reduzidos ao longo do tempo, por conta do aperfeiçoamento do material HTS. Os valores estimados, em 2015, são para tamanhos de dispositivos padronizados na coluna J, linhas 11 até 14.

A parametrização do sistema de criogenia, admitindo-se a melhoria prevista, é realizada através da célula K10 (ver Figura 4.7), que informa a potência específica (número de Watts necessário para remover 1 Watt de calor), da célula I15, que contém a eficiência de Carnot, e da célula I16, que informa o percentual da eficiência de Carnot que o sistema criogênico pode atingir.

Informações a respeito do custo da criogenia (coluna E), da taxa de desconto (coluna F), da vida útil (coluna G) e da taxa de substituição de cada dispositivo (coluna H) estão agrupadas entre as linhas 20 e 23, nas colunas entre E e H, detalhes mostrados na Figura 4.10. Parte dos parâmetros obtidos através dos comparativos realizados para cada aplicação são transportados para estas células.



**Figura 4.9:** Evolução do material HTS e demanda de fios por dispositivo. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Parâmetros de Entrada	Energia Economizada	Ano Inicial	Ano Final	Percentual no ano	Anos até 50% da penetração	Fração Máxima Mercado (%)	Fita HTS Necessária	Por Dispositivo de Cada Watt removido
Motores	1,290%	2026	2032	0,10	15	60	115,8751445	per 20 MVA
Transformadores	0,290%	2030	2033	0,25	20	70	450	per 65 MVA
Geradores	1,030%	2023	2032	0,30	22	60	111,6666667	per 20 MVA
Cabos	1,390%	2022	2030	0,20	18	50	14	per 100 metros @ 2000 A.
Média	1,000%							

Dados sobre ciclo de vida:	Tamanhos Básicos	Criogenia por unidade de dispositivo	Taxa de Desconto (%)	Anos da útil do dispositivo	Percentual anual de substituição	fraction national to device
Motores \$ 10 <sup>-6</sup> /MWh	748	0,005168891	10,00%	30	2,1%	3,714057803
Transformadores \$ 10 <sup>-3</sup> /65 MVA/100m	225	1454,3	7,00%	40	1,5%	1084,05
Geradores \$ 10 <sup>-3</sup> /MWh/Gen.	250	4,08	7,00%	30	2,1%	1533
Cabos \$ 10 <sup>-3</sup> /Mile	1,609344	372,10	7,00%	40	0,2%	0,022588

**Figura 4.10:** Detalhes da parametrização dos dispositivos. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Sobre o uso das taxas de desconto, o objetivo das mesmas é fazer o ajuste dos valores futuros para valores presentes. Entretanto, os valores obtidos em dinheiro são de difícil interpretação, devido a necessidade de uso das referidas taxas e ainda, como os valores estão em dólares, sua conversão cambial futura é de difícil previsão. Assim, recomenda-se um foco maior nos resultados que envolvem valores de energia economizada, pois estes são imunes aos parâmetros econômicos.

Com relação à taxa de substituição, deve-se considerar que os dispositivos supercondutores, quando estiverem comercialmente disponíveis, e forem economicamente viáveis, não apenas serão instalados dispositivos novos, como alguns dos dispositivos já instalados, de tecnologia convencional, terão sua vida útil encerrada e serão substituídos. Os números adotados no estudo seguem aqueles propostos por [14], não tendo sido investigada a possibilidade de aplicação de outras metodologias.

Ainda nesta planilha, à direita, entre as colunas W e AA, são apresentados os custos, decrescentes, para os sistemas de criogenia, ilustrado pela Figura 4.11. A queda de preços deve-se a economia de escala, obtida a partir das vendas crescentes das unidades. Este efeito é modelado através de uma ligação entre a planilha “Assumptions” e a planilha “Results”. A célula Y6 assinala um valor mínimo de vendas de sistemas criogênicos. O efeito da escala de vendas é iniciado quando este mínimo é ultrapassado pelas vendas. A coluna X importa as unidades vendidas, a coluna Y realiza o cálculo da redução de custo, e a coluna Z acumula a redução de custos, em escala, ao longo do

tempo. Este modelo de diminuição de custos adotou os valores propostos por [14], porém, defasados no tempo, iniciando-se o ciclo no ano de 2015.

Na coluna AA são mostrados os sistemas de criogenia comercializados com foco em aplicações de supercondutividade. Existe uma parcela destes sistemas, representados por 100 unidades anuais, definidos na célula Y6, que são focados em outras aplicações, e não são considerados nos cálculos. O resultado da comercialização dos sistemas é representado através de gráfico, na Figura 4.12. A totalização dos sistemas é a soma de todos os sistemas necessários para operar os equipamentos HTS novos estimados para comercialização, que podem ser obtidos na planilha *Results*. (células F153, F187, F221 e F254). A Figura 4.13 apresenta a evolução do fator multiplicador de redução do valor dos sistemas criogênicos, que indica a redução de preço obtida através do aprendizado de fabricação e economias de escala.

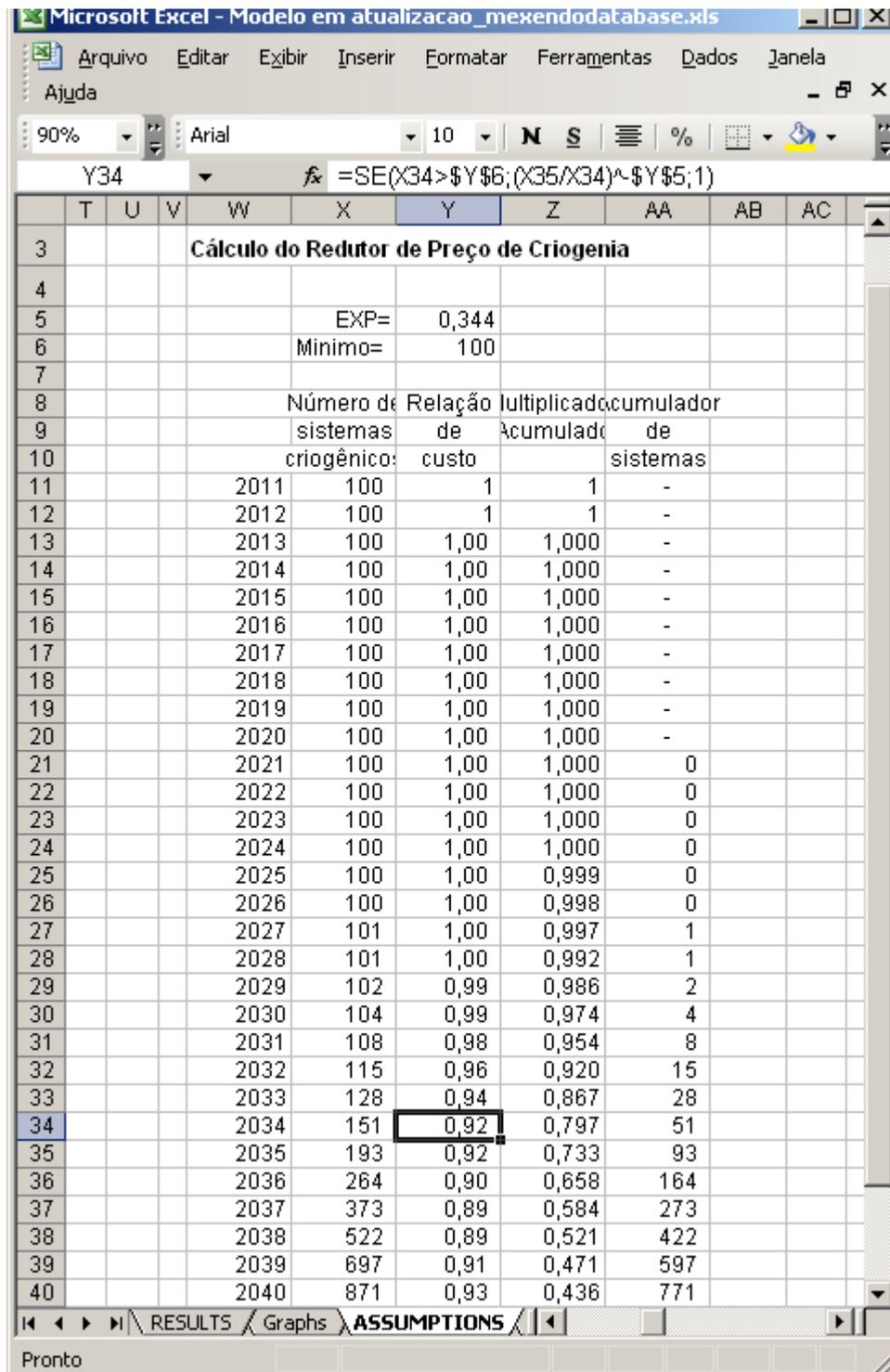
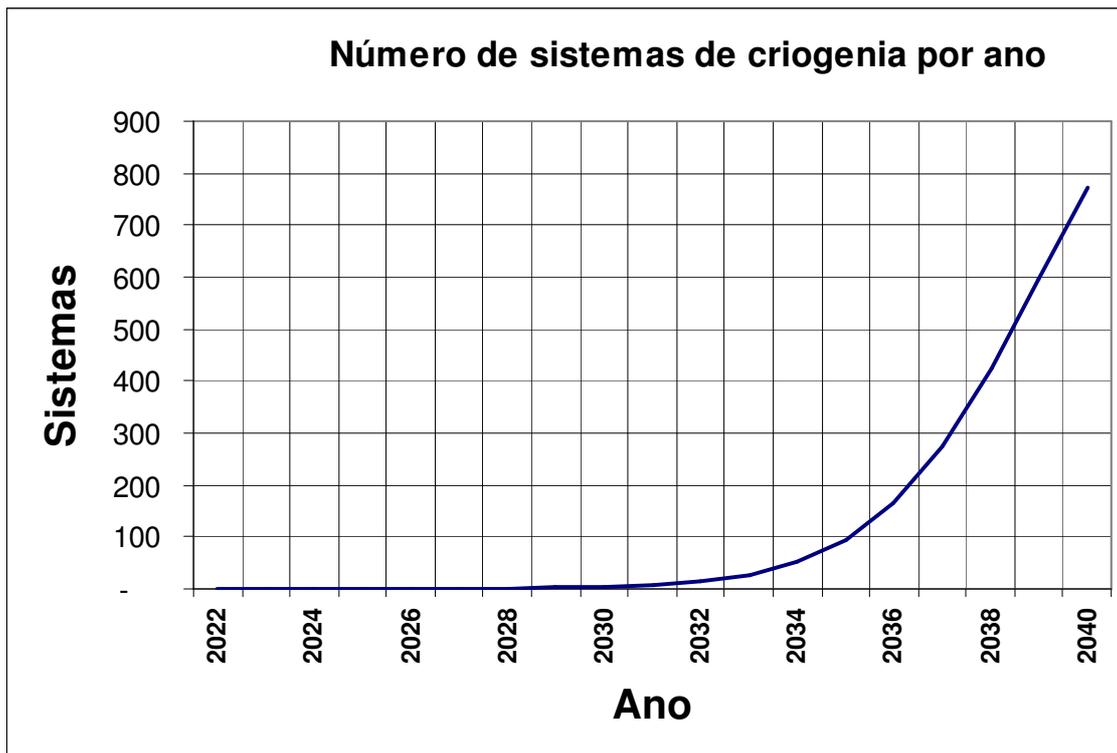
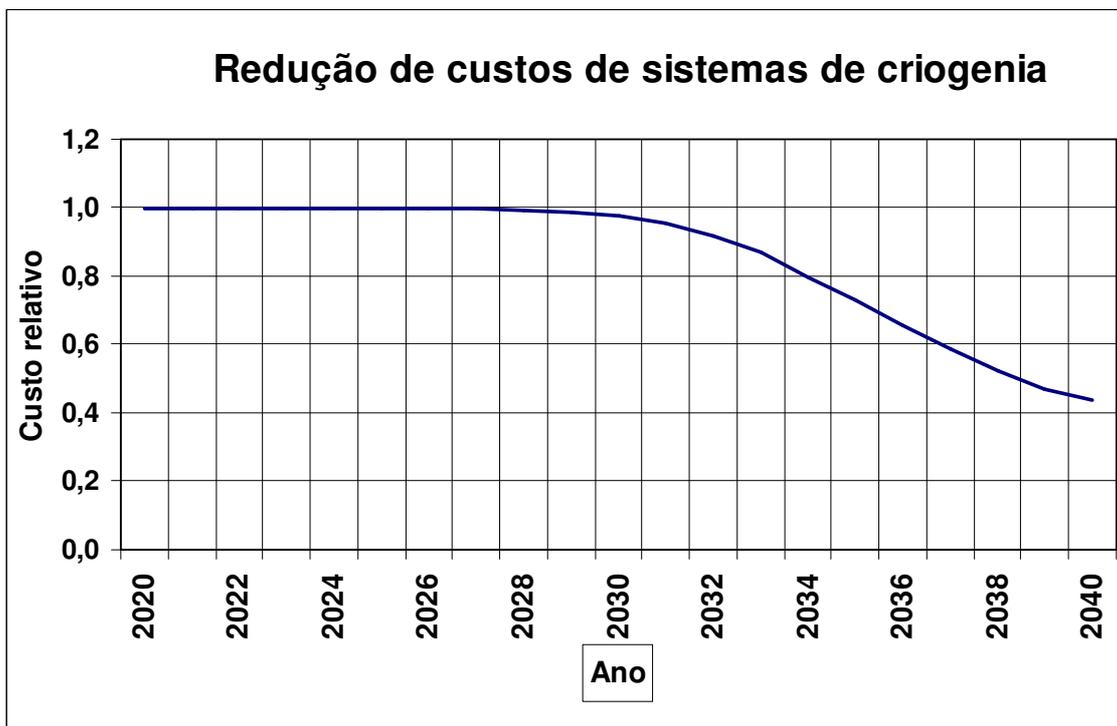


Figura 4.11: Detalhes da parametrização do custo da criogenia. Fonte: Elaborado pelo autor.



**Figura 4.12:** Comercialização dos sistemas de criogenia. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

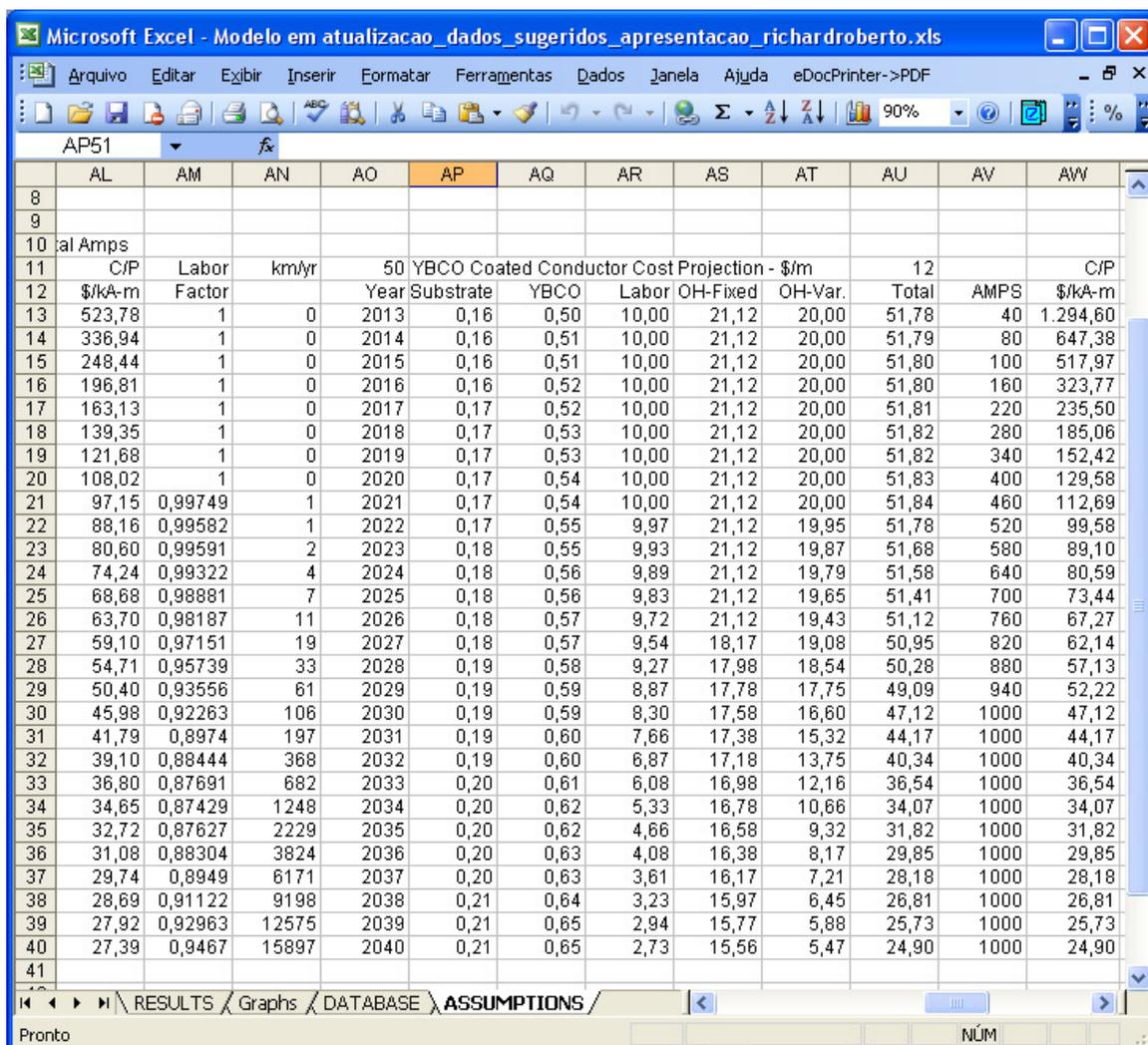


**Figura 4.13:** Redução do custo relativo dos sistemas de criogenia. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

A seguir, entre as colunas AD e AW, é modelada a evolução de custos do material HTS. O modelo de simulação possibilita utilizar uma comparação entre duas tecnologias de fio distintas, de modo a compará-las e definir a melhor opção. Este recurso foi implementado visando a comparação dos materiais BSCCO e YBCO. Na atualização do modelo, realizada aqui, optou-se por não realizar esta comparação, e manter o YBCO como material padrão. Porém, nada impede novas análises, comparando outros materiais, com a devida estimativa de preço. Esta ferramenta pode se tornar mais útil, caso no futuro novas ligas possam ser exploradas, ou mesmo a realização de comparações entre diferentes métodos de fabricação para mesmo material, quando houver dados concretos acerca da possível diminuição dos custos dos mesmos.

Para o caso da comparação entre as tecnologias de fio, deve-se observar que o parâmetro de comparação não é apenas o preço do fio, mas sim, a figura de mérito do  $\$/kA.m$ , calculada nas colunas AL e AW, respectivamente. Não apenas o material deve ser o mais barato, como também sua capacidade de corrente deve ser considerada, no caso da comparação, não realizada aqui.

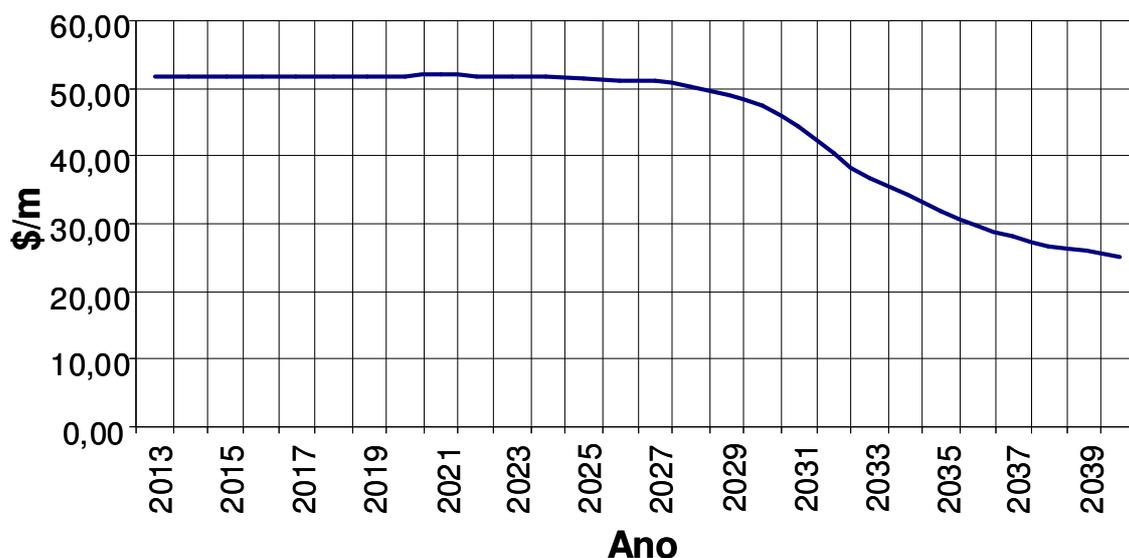
Considerando-se o já citado “otimismo” do estudo de caso norte-americano, optou-se por utilizar a mesma característica de redução de preços, porém, iniciando-se em 2015, e supondo que o material pode atingir o patamar de custos de \$20. O resultado da estimativa é apresentado na Figura 4.14.



**Figura 4.14:** Estimativa da evolução dos custos do material HTS. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Além da apresentação tabular, também foi preparado um gráfico, apresentando a redução do preço ao longo dos anos, mostrado na Figura 4.15.

## Custo do Fio HTS em \$/m



**Figura 4.15:** Redução do preço do fio ao longo dos anos. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Após computar os dados na planilha *Assumptions*, a parametrização seguiu na planilha *Database*. Esta planilha é composta, basicamente, por blocos de dados, que variam anualmente. Além da alteração dos dados, alguns recursos disponíveis não foram usados, especificamente os dados relativos a poluição, visto que este estudo não apresentou enfoque ambiental.

Na planilha *Database* estão presentes ainda alguns cálculos intermediários, baseados nas informações apresentadas na planilha *Assumptions*. Durante a edição do modelo, é importante observar e não alterar determinadas fórmulas. Por exemplo, os coeficientes utilizados para composição da curva “S” na planilha *Assumptions*, serão convertidos e usados nesta planilha, para calcular o percentual de energia para cada um dos 4 dispositivos.

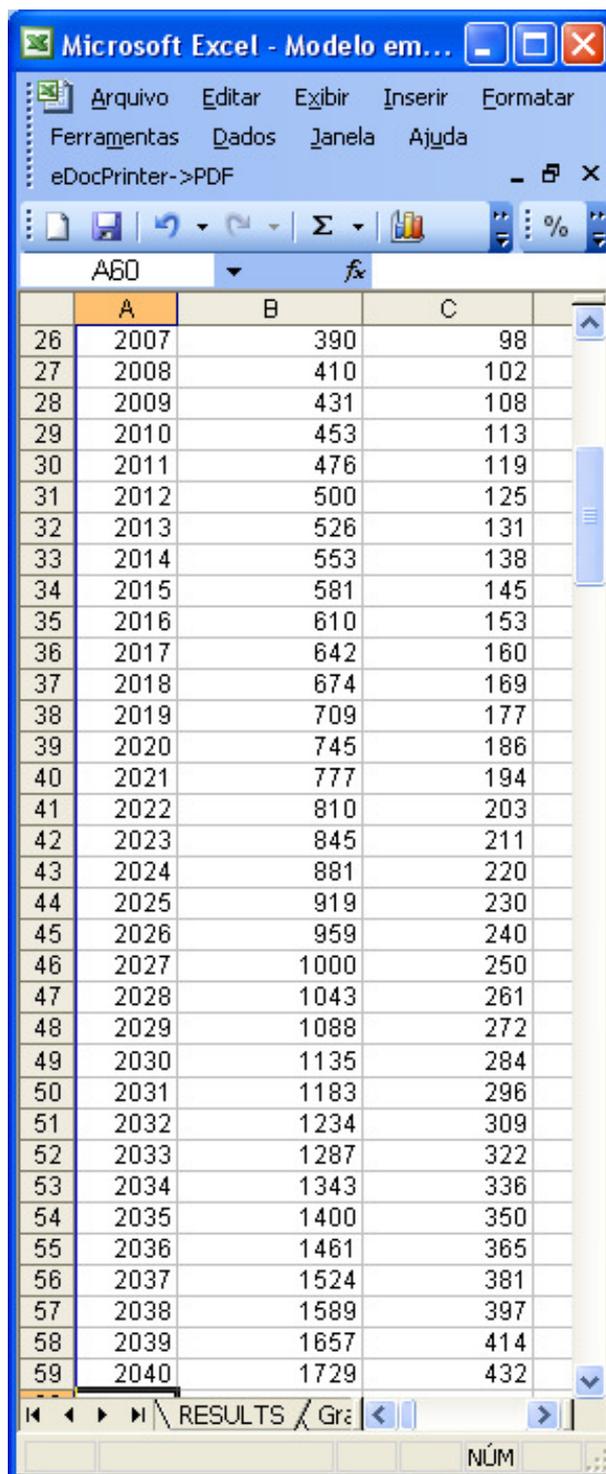
Por outro lado, determinadas alterações conduzidas aqui facilitarão o ajuste para que outros possam conduzir estudos de caso do sistema brasileiro. Os dados energéticos foram alterados, substituindo-se os valores do estudo de caso norte-americano pelos dados do Brasil.

Esta planilha apresenta conteúdo, basicamente, na parte superior, na horizontal, e do lado esquerdo, na vertical. Mais uma vez, a preocupação não foi em gerar uma planilha para impressão, mas sim, um modelo funcional.

Na parte superior da planilha, o estudo de caso norte-americano [14] utilizou dados oriundos do modelo NEMS [14], que envolve dados sobre população, eletricidade

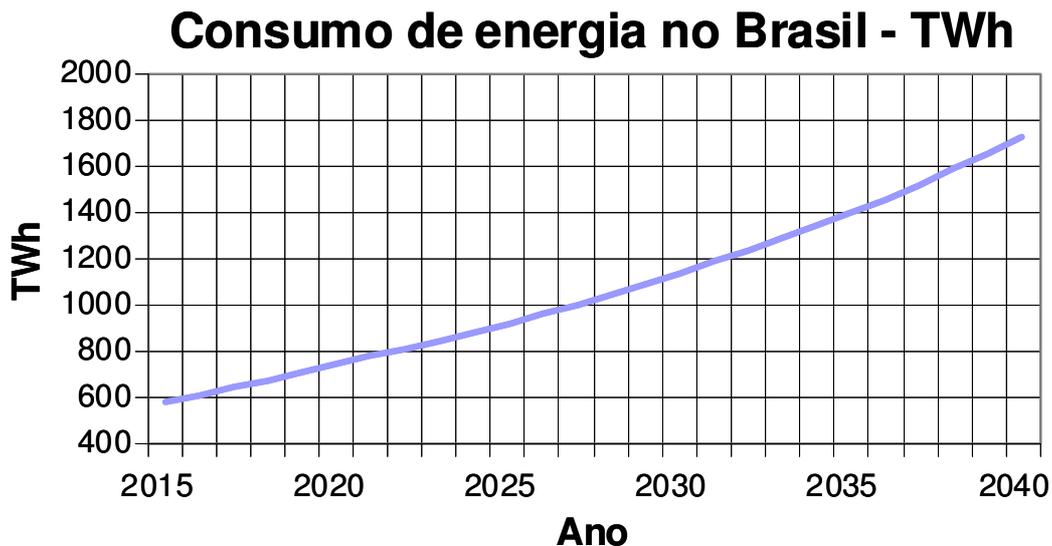
produzida e vendida e emissões de gases. Para o estudo de caso brasileiro, o plano nacional de energia [67] foi a principal referência. Devido ao enfoque do estudo aqui realizado, optou-se por não trabalhar a parte ambiental, que, entretanto, pode ser explorada em trabalhos futuros. O modelo permite prever as emissões de gases de efeito estufa evitadas.

Inicialmente, nas colunas A e B, são ajustados os valores de consumo de eletricidade, no Brasil, ao longo dos próximos anos. Foi adotada uma taxa de crescimento de 5,1% até 2020 e de 4,3% daí em diante, assim como foi definido anteriormente, na seção 4.2.1. A parametrização é feita em TWh, como mostra a Figura 4.16.



**Figura 4.16:** Parametrização da evolução do consumo de eletricidade. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

A estimativa da evolução do consumo de energia elétrica no Brasil, sob forma de gráfico, pode ser vista através da Figura 4.17.



**Figura 4.17:** Estimativa da evolução do consumo de eletricidade no Brasil. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Esta parametrização deve ser realizada apenas neste ponto, pois outras células desta planilha copiam estes valores. Mais uma vez, o recurso de auditoria de fórmulas pode ser usado para verificar esta dependência, se for o caso.

O modelo de penetração de mercado, baseado no uso das curvas “S”, definido na planilha *Assumptions*, teve seus dados calculados entre as colunas AN e BG. Como as curvas são para cada dispositivo, os parâmetros para cada aplicação ficam separados. A parte relativa aos motores fica entre as colunas AO e AR; para transformadores, AT até AW; para geradores, AY até BB e para cabos BD até BG.

As duas primeiras colunas, para cada aplicação, indicam o ano, enquanto a segunda e a terceira são os fatores exponenciais usados para calcular a penetração de mercado de cada dispositivo. Estes fatores são usados no cálculo das vendas de cada dispositivo. Esta seção da planilha é ilustrada na Figura 4.18.

Visando avaliar o impacto econômico das aplicações de supercondutores, a seção compreendida entre as colunas BK e CG realiza o cálculo do valor presente, para cada kWh economizado. A tarifa de energia elétrica foi estimada como 15 centavos de dólar, no ano de 2015, e aumentado de 10% deste valor a cada ano. Deve-se observar que, estimativas financeiras deste tipo não são simples, e o estudo, ao envolver valores financeiros, apresenta maiores fontes de incerteza que os fatores de energia (kWh).

As colunas BK e BL, respectivamente, trazem o ano e a tarifa correspondente. De acordo com o ano, o valor presente líquido devido as tarifas futuras é calculado, usando-se a taxa de retorno admitida na planilha *Assumptions* e a função VPL do Microsoft Excel. Esta função calcula o valor líquido atual de um investimento

utilizando a taxa de desconto e uma série de futuros pagamentos (valores negativos) e receita (valores positivos) [113]. Os resultados, para cada aplicação, ficam nas colunas BM até BP, como mostra a Figura 4.19.

The image shows a Microsoft Excel spreadsheet titled "Modelo em atualizacao\_mexendodatabase.xls". The spreadsheet is organized into columns labeled AN through BG and rows numbered 22 through 60. The data is structured as follows:

- Row 22:** AN, AO, AP, AQ, AR, AS, AT, AU, AV, AW, AX, AY, AZ, BA, BB, BC, BD, BE, BF, BG. A large "Página 4" watermark is overlaid on the spreadsheet.
- Row 23:** "Percentual das curvas 'S'" (Motor, Cabo).
- Row 24:** "Motor Saturation Curve" (2,50185).
- Row 25:** "Trafa Saturation Curve" (5,682613).
- Row 26:** "Gerador Saturation Curve" (4,534).
- Row 27:** "fator de penetração" (3,26237).
- Row 28:** "fator de penetração" (0).
- Row 29:** "fator de penetração" (0).
- Row 30:** "fator de penetração" (0).
- Row 31:** 2011, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 32:** 2012, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 33:** 2013, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 34:** 2014, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 35:** 2015, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 36:** 2016, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 37:** 2017, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 38:** 2018, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 39:** 2019, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 40:** 2020, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 0, 0,00468, 290,242, 0.
- Row 41:** 2021, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 0, 0,0087, 142,95, 0, 1, 0,00636, 213,618, 0,00149.
- Row 42:** 2022, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 1, 0,0109, 114,65, 0,0057, 2, 0,00864, 157,223, 0,00275.
- Row 43:** 2023, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 2, 0,0136, 91,961, 0,0088, 3, 0,01174, 115,716, 0,00507.
- Row 44:** 2024, 0, 0,00304, 490,492, 0, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 3, 0,0169, 73,76, 0,0137, 4, 0,01595, 85,1671, 0,00936.
- Row 45:** 2025, 1, 0,00453, 328,884, 0,00083, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 4, 0,0211, 59,161, 0,0214, 5, 0,02168, 62,683, 0,01728.
- Row 46:** 2026, 2, 0,00676, 220,523, 0,00184, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 5, 0,0263, 47,451, 0,0332, 6, 0,02945, 46,1347, 0,0319.
- Row 47:** 2027, 3, 0,01009, 147,865, 0,00409, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 6, 0,0328, 38,059, 0,0516, 7, 0,04001, 33,9551, 0,05885.
- Row 48:** 2028, 4, 0,01504, 99,1461, 0,0091, 0, 0,03234, 36,8736, 0, 7, 0,0408, 30,526, 0,0802, 8, 0,05437, 24,991, 0,10854.
- Row 49:** 2029, 5, 0,02243, 66,4793, 0,02024, 1, 0,03856, 30,9236, 0,087177, 8, 0,0509, 24,484, 0,1245, 9, 0,07387, 18,3933, 0,2.
- Row 50:** 2030, 6, 0,03346, 44,5756, 0,045, 2, 0,04598, 25,9337, 0,123887, 9, 0,0635, 19,638, 0,1933, 10, 0,10037, 13,5375, 0,36797.
- Row 51:** 2031, 7, 0,0499, 29,8888, 0,1, 3, 0,05483, 21,749, 0,176015, 10, 0,0792, 15,751, 0,3, 11, 0,13637, 9,9636, 0,67508.
- Row 52:** 2032, 8, 0,07442, 20,041, 0,22197, 4, 0,06537, 18,2396, 0,25, 11, 0,0987, 12,634, 0,465, 12, 0,18528, 7,33321, 1,23216.
- Row 53:** 2033, 9, 0,11098, 13,4378, 0,49148, 5, 0,07795, 15,2964, 0,354925, 12, 0,123, 10,133, 0,7198, 13, 0,25174, 5,39724, 2,22818.
- Row 54:** 2034, 10, 0,16552, 9,01033, 1,08232, 6, 0,09295, 12,8282, 0,503569, 13, 0,1534, 8,1276, 1,1115, 14, 0,34204, 3,97237, 3,96399.
- Row 55:** 2035, 11, 0,24685, 6,04159, 2,3553, 7, 0,11084, 10,7582, 0,713827, 14, 0,1913, 6,5189, 1,7101, 15, 0,46472, 2,92367, 6,85759.
- Row 56:** 2036, 12, 0,36815, 4,051, 4,9995, 8, 0,13216, 9,02234, 1,0106, 15, 0,2384, 5,2287, 2,6169, 16, 0,63142, 2,15182, 11,3432.
- Row 57:** 2037, 13, 0,54906, 2,71627, 10,0888, 9, 0,15759, 7,5664, 1,428212, 16, 0,2973, 4,1938, 3,9717, 17, 0,9579, 1,58374, 17,5682.
- Row 58:** 2038, 14, 0,81885, 1,82131, 18,6091, 10, 0,18791, 6,34547, 2,013356, 17, 0,3707, 3,3637, 5,9552, 18, 1,16563, 1,16563, 25.
- Row 59:** 2039, 15, 1,22122, 1,22122, 30, 11, 0,22407, 5,32156, 2,828353, 18, 0,4621, 2,698, 8,7741, 19, 1,58374, 0,8579, 32,4318.
- Row 60:** 2040, 16, 1,82131, 0,81885, 41,3909, 12, 0,26718, 4,46296, 3,954067, 19, 0,5762, 2,164, 12,616, 20, 2,15182, 0,63142, 38,6568.

Figura 4.18: Modelo de penetração de mercado para cada dispositivo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Microsoft Excel - Modelo em atualizacao\_mexendodatabase.xls

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

90% Arial 10 N I S %

BW31

22 Savings - Present Value Calculation valores em centavos

23

24 Modified NPV calculation BWM 4/26/01

25

26

27 Savings Through 2025

28

29

30 Life(n) 31 40 35 40 4(1-

31 Disc Rte 10,00% 7,00% 7,00% 7,00% lifetime

32 Year tarifa Motors Xfmrs Gens Cables disc1 rate

33 energia

34 2015 16,95 173,84 223,63 223,63 223,63

35 2016 17,10 173,44 221,75 221,75 221,75

36 2017 17,25 172,85 219,59 219,59 219,59

37 2018 17,40 172,05 217,12 217,12 217,12

38 2019 17,55 171,00 214,32 214,32 214,32

39 2020 17,70 169,70 211,16 211,16 211,16

40 2021 17,85 168,10 207,64 207,64 207,64

41 2022 18,00 166,19 203,71 203,71 203,71

42 2023 18,15 163,93 199,35 199,35 199,35

43 2024 18,30 161,29 194,53 194,53 194,53

44 2025 18,45 158,22 189,21 189,21 189,21

45 2026 18,60 154,69 183,37 183,37 183,37

46 2027 18,75 150,66 176,97 176,97 176,97

47 2028 18,90 146,06 169,96 169,96 169,96

48 2029 19,05 140,84 162,31 162,31 162,31

49 2030 19,20 134,94 153,97 153,97 153,97

50 2031 19,35 128,30 144,88 144,88 144,88

51 2032 19,50 120,84 135,01 135,01 135,01

52 2033 19,65 112,47 124,29 124,29 124,29

53 2034 19,80 103,11 112,66 112,66 112,66

54 2035 19,95 92,65 100,07 100,07 100,07

55 2036 20,10 80,99 86,44 86,44 86,44

56 2037 20,25 68,01 71,70 71,70 71,70

57 2038 20,40 53,57 55,77 55,77 55,77

58 2039 20,55 37,54 38,57 38,57 38,57

59 2040 20,70 19,74 20,01 20,01 20,01

60

61

RESULTS / Graphs / ASSUMPTIONS / DATABASE /

Pronto

**Figura 4.19:** Cálculo do valor presente líquido. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Como a vida útil dos equipamentos pode ser superior ao número de anos compreendidos no período do estudo (25), as colunas BR até BU complementam o número de anos necessário, de acordo com o ano onde o novo dispositivo foi instalado. O modelo supõe que, a partir de 2040, a tarifa de energia é constante. A soma dos valores obtidos anteriormente, com o valor complementar, devido a vida útil acima de 25 anos, vem nas colunas BW até BZ e representa a economia real de cada dispositivo, por kWh, como mostra a Figura 4.20.

	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ
22									
23									
24									
25									
26									
27									
28	Life of the Device								
29	0,909	0,935	0,935	0,935					
30	31	40	35	40					
31	10,00%	7,00%	7,00%	7,00%		Economia Total			
32	Motors	Xfmrs.	Gens.	Cables		Motors	Xfmrs.	Gens.	Cables
33									
34	6,91	32,25	24,02	32,25		180,74	255,88	247,66	255,88
35	8,73	35,93	27,71	35,93		182,17	257,69	249,46	257,69
36	10,73	39,88	31,65	39,88		183,58	259,47	251,24	259,47
37	12,93	44,10	35,88	44,10		184,98	261,22	252,99	261,22
38	15,36	48,62	40,39	48,62		186,36	262,93	254,71	262,93
39	18,03	53,45	45,23	53,45		187,72	264,61	256,39	264,61
40	20,96	58,62	50,40	58,62		189,06	266,26	258,03	266,26
41	24,19	64,15	55,93	64,15		190,38	267,86	259,64	267,86
42	27,74	70,07	61,85	70,07		191,67	269,42	261,20	269,42
43	31,64	76,41	68,19	76,41		192,93	270,94	262,71	270,94
44	35,94	83,19	74,96	83,19		194,16	272,40	264,18	272,40
45	40,66	90,44	82,22	90,44		195,36	273,81	265,59	273,81
46	45,86	98,20	89,98	98,20		196,52	275,17	266,95	275,17
47	51,58	106,51	98,28	106,51		197,63	276,47	268,25	276,47
48	57,87	115,39	107,17	115,39		198,71	277,70	269,48	277,70
49	64,78	124,90	116,68	124,90		199,73	278,86	270,64	278,86
50	72,39	135,07	126,85	135,07		200,69	279,95	271,73	279,95
51	80,76	145,96	137,73	145,96		201,60	280,97	272,74	280,97
52	89,97	157,60	149,38	157,60		202,44	281,89	273,67	281,89
53	100,10	170,07	161,84	170,07		203,21	282,73	274,50	282,73
54	111,24	183,40	175,18	183,40		203,89	283,47	275,24	283,47
55	123,49	197,67	189,44	197,67		204,49	284,10	275,88	284,10
56	136,97	212,93	204,71	212,93		204,99	284,63	276,41	284,63
57	151,80	229,27	221,05	229,27		205,38	285,04	276,81	285,04
58	168,11	246,75	238,53	246,75		205,65	285,32	277,09	285,32
59	186,06	265,45	257,23	265,45		205,79	285,46	277,24	285,46
60									

**Figura 4.20:** Cálculo dos anos complementares a vida útil do equipamento. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os dados situados a esquerda da planilha são específicos de cada aplicação. Há cinco blocos de informação, um deles para novos motores, outro para motores substituídos, um para transformadores, outro para geradores e um para cabos.

O primeiro conjunto, destinado a novos motores, está posicionado entre as linhas 10 e 59, colunas A até S. As duas primeiras colunas indicam o ano, e o consumo de energia estimado para aquele ano. A coluna C informa o quantitativo da energia que vai para indústria e D é a eletricidade que é empregada em motores (todos os setores). A coluna F mostra a energia que é estimada para os motores incluídos no escopo deste estudo. As colunas I e J são calculadas a partir dos fatores de penetração de mercado. As colunas E, G, I e K não apresentam efeitos sob os cálculos finais: foram previstos para

tratar de motores de menor porte, porém, no caso deste estudo de caso, bem como do estudo de caso norte-americano, estes não foram considerados candidatos a substituição.

Ainda no conjunto de dados sobre novos motores, que está mostrado na Figura 4.21, as colunas K e L apresentam a eletricidade empregada anualmente em motores HTS, que é totalizada na coluna M. A coluna N faz a totalização ao longo dos anos. Já na coluna O é calculada a energia economizada pelos motores HTS, que multiplicada pela tarifa, que está na coluna P, viabiliza o cálculo dos custos evitados, anualmente, que são totalizados na coluna R. O total de motores vendidos, por ano, está apresentado na coluna S.

O bloco de dados seguinte, situado entre as linhas 63 e 107, destina-se a totalizar as informações relativas a substituição de motores. O funcionamento é análogo ao bloco de motores, porém, a coluna H é diferente, pois representa os motores substituídos (em energia), e não instalações novas. O total de novos motores é indicado na coluna W. As colunas situadas entre S e V são responsáveis por totalizar todo o benefício dos motores, advindo das novas instalações e substituições, como mostra a Figura 4.22.

O bloco de dados localizado a seguir, entre as linhas 116 a 154, mostrado na Figura 4.23, diz respeito a transformadores. Aqui, no mesmo bloco são tratados tanto os equipamentos novos como os substituídos. Novamente, as colunas A e B trazem dados acerca do total de energia consumido anualmente no Brasil. As colunas C e D trazem os valores estimados de energia que serão transformados por transformadores HTS, respectivamente por substituição e por nova instalação. A coluna E traz os fatores da curva de penetração, e o cálculo da coluna F,  $E \times (C + D)$ , mostra o total de GWh capturados no ano em questão (coluna A). A coluna G é o totalizador (integrador) dos valores da coluna F, enquanto a coluna H é o percentual economizado, estimado anteriormente na comparação HTS contra convencional.

Assim como no caso dos motores, é estimado o custo econômico evitado, que é apresentado na coluna J. A coluna K realiza a integração dos valores de J, funcionando como um totalizador de todos os ganhos obtidos.

A seguir, os dados relativos a geradores são apresentados entre as linhas 163 e 201. Assim como nos anteriores, as duas primeiras colunas dizem respeito ao ano e ao consumo de eletricidade. Deve-se observar que, estes dados não precisam ser preenchidos: eles são obtidos a partir do primeiro bloco, de motores. As colunas subsequentes seguem a mesma lógica já apresentada, como mostra a Figura 4.24.

Finalizando a apresentação dos blocos de dados, os cálculos referentes ao uso de cabos estão localizados entre as linhas 209 e 247, mostrado na Figura 4.25. Seguindo a lógica já detalhada nos blocos de dados anteriores, deve ser destacado apenas que, na coluna C, onde são apresentados os dados referentes a substituição de dispositivos, é utilizado um valor muito pequeno, pois a expectativa de substituição de cabos em linhas é mínimo. O foco maior diz respeito a novas instalações.

MOTORES NOVOS									
Part I - Motors									
energia nacional para motores=									
taxa de crescimento= Annual increase =									
4,30% 1,018 0,32									
Total Motor Load									
Total Motor Load									
Increase in Motor Load									
Increase in Motor Load									
HTSC % Market Penetration									
HTSC % Market Penetration									
TOTAL INDUSTRIAL Motor Load									
TWWh (1) TWWh (1) TWWh (2)									
TWWh (3) TWWh (3) GWh (4) GWh (5)									
51-125 >500 51-125 >500 51-125 (6) >500 (7)									
2002	304	76	97	0	6				
2003	317	79	102	0	6	0	262	0	0
2004	331	83	106	0	7	0	273	0	0
2005	345	86	110	0	7	0	285	0	0
2006	360	90	115	0	7	0	297	0	0
2007	375	94	120	0	8	0	310	0	0
2008	392	98	125	0	8	0	323	0	0
2009	408	102	131	0	9	0	337	0	0
2010	426	107	136	0	9	0	351	0	0
2011	444	111	142	0	9	0	366	0	0
2012	463	116	148	0	9	0	382	0	0
2013	483	121	155	0	10	0	399	0,0	0,0
2014	504	126	161	0	10	0	416	0,0	0,0
2015	526	131	168	0	11	0	434	0,0	0,0
2016	548	137	176	0	11	0	452	0,0	0,0
2017	572	143	183	0	11	0	472	0,0	0,0

(a)

	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
16	HTSC	HTSC	HTSC Increment	HTSC	HTSC	Industrial	HTSC	HTSC	Number of
17	Increase in	Increase in	Increase in	Total	Loss Savings	Energy	Annual	Cumulative	New HTSC
18	Motor Load	Motor Load	Motor Load	Motor Load	Motor Load	Rate (1)	Motor Load	Motor Load	Motors each
19	51-125	>500	Each Year	Served	Total		Benefits (13)	Benefits (14)	Year
20	GWh (8)	GWh (9)	GWh (10)	GWh (11)	GWh (12)	Cents/kwh	\$ thousands	\$ thousands	
21						15,00	-	-	
22	0	0	0	0	0	15,15	-	-	0
23	0	0	0	0	0	15,30	-	-	0
24	0	0	0	0	0	15,45	-	-	0
25	0	0	0	0	0	15,60	-	-	0
26	0	0	0	0	0	15,75	-	-	0
27	0	0	0	0	0	15,90	-	-	0
28	0	0	0	0	0	16,05	-	-	0
29	0	0	0	0	0	16,20	-	-	0
30	0	0	0	0	0	16,35	-	-	0
31	0	0	0	0	0	16,50	-	-	0
32	0	0	0	0	0	16,65	-	-	0
33	0	0	0	0	0	16,80	-	-	0
34	0	0	0	0	0	16,95	-	-	0
35	0	0	0	0	0	17,10	-	-	0
36	0	0	0	0	0	17,25	-	-	0
37	0	0	0	0	0	17,40	-	-	0
38	0	0	0	0	0	17,55	-	-	0
39	0	0	0	0	0	17,70	-	-	0
40	0	0	0	0	0	17,85	-	-	0
41	0	0	0	0	0	18,00	-	-	0
42	0	0	0	0	0	18,15	-	-	0
43	0	0	0	0	0	18,30	-	-	0

(b)

Figura 4.21: (a) Bloco de dados de motores; (b) Totalização dos dados. Fonte: Elaborado pelo autor.

	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
60											
61											
62											
63											
64											
65	Energy	Annual	Cumulative	Annual	HTSC	Total	Total				
66	Rate (1)	Replaced	Replaced	Motor Load	Cumulative	HTSC	HTSC				
67		Benefits (13)	Benefits (14)	Benefits (13)	Motor Load	Annual	Cumulative				
68	Cents/kwh	\$ thousands	\$ thousands	\$ thousands	\$ thousands	Benefits (15)	Benefits (16)			Number of	
69	15,00	-	-	-	-	\$ thousands	\$ thousands			HTS Replace	
70	15,15	-	-	-	-					Motors each	
71	15,30	-	-	-	-					Year	
72	15,45	-	-	-	-						
73	15,60	-	-	-	-						
74	15,75	-	-	-	-						
75	15,90	-	-	-	-						
76	16,05	-	-	-	-						
77	16,20	-	-	-	-						
78	16,35	-	-	-	-						
79	16,50	-	-	-	-						
80	16,65	-	-	-	-						
81	16,80	-	-	-	-						
82	16,95	-	-	-	-						
83	17,10	-	-	-	-						
84	17,25	-	-	-	-						
85	17,40	-	-	-	-						
86	17,55	-	-	-	-						
87	17,70	-	-	-	-						
88	17,85	-	-	-	-						
89	18,00	-	-	-	-						
90	18,15	-	-	-	-						
91	18,30	-	-	-	-						
92	18,45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
93	18,60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
94	18,75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
95	18,90	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
96	19,05	0	1	1	1	1	1	1	2	2	0
97	19,20	1	1	2	2	3	2	2	4	4	0
98	19,35	2	3	4	6	6	6	10	0	0	

Figura 4.22: Totalização dos ganhos com motores novos e substituídos. Fonte: Elaborado pelo autor.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
110	Part II - Transformers												
111		# of times elec. is xformed:											
112		1											
113													
114		TOTAL	Substituição	Novos	HTSC	Annual	Total	Energy	Energy	Annual	HTSC	Number of	HTS Transformer
115		TWh (1)	TWh (2)	TWh (2)	Penetration	GWh (2)	Cummul	Savings	Rate (1)	Benefits (13)	Benefits (14)	Large HTS	Capacity
116	2002	304	5			0	0	0	15,00	-	-	transformers	installed
117	2003	317	5	13	0	0	0	0	15,15	-	-	each year	this year
118	2004	331	5	14	0	0	0	0	15,30	-	-	Units	MVA
119	2005	345	5	14	0	0	0	0	15,45	-	-		
120	2006	360	6	15	0	0	0	0	15,60	-	-		
121	2007	375	6	15	0	0	0	0	15,75	-	-		
122	2008	392	6	16	0	0	0	0	15,90	-	-		
123	2009	408	6	17	0	0	0	0	16,05	-	-		
124	2010	426	7	18	0	0	0	0	16,20	-	-		
125	2011	444	7	18	0	0	0	0	16,35	-	-		
126	2012	463	7	19	0	0	0	0	16,50	-	-		
127	2013	483	7	20	0,0	0	0	0	16,65	-	-		
128	2014	504	8	21	0,0	0	0	0	16,80	-	-		
129	2015	526	8	22	0,0	0	0	0	16,95	-	-		
130	2016	548	8	23	0,0	0	0	0	17,10	-	-		
131	2017	572	9	24	0,0	0	0	0	17,25	-	-		
132	2018	597	9	25	0,0	0	0	0	17,40	-	-		
133	2019	622	10	26	0,0	0	0	0,000	17,65	-	-		
134	2020	649	10	27	0,0	0	0	0	17,70	-	-		
135	2021	677	10	28	0,0	0	0	0	17,85	-	-		
136	2022	706	11	29	0,0	0	0	0	18,00	-	-		
137	2023	736	11	30	0,0	0	0	0	18,15	-	-		
138	2024	768	12	32	0,0	0	0	0	18,30	-	-		
139	2025	801	12	33	0,0	0	0	0	18,45	-	-		
140	2026	836	13	34	0,0	0	0	0	18,60	-	-		
141	2027	872	13	36	0,0	0	0	0	18,75	-	-		
142	2028	909	14	37	0,0	0	0	0	18,90	-	-		
143	2029	948	15	39	0,1	47	47	0	19,05	26	26	0	10
144	2030	989	15	41	0,1	69	116	0	19,20	65	91	0	14
145	2031	1031	16	43	0,2	103	219	1	19,35	123	214	1	21
146	2032	1076	17	44	0,3	152	372	1	19,50	210	424	1	32
147	2033	1122	17	46	0,4	226	597	2	19,65	340	764	2	47
148	2024	1170	18	48	0,5	334	934	3	19,80	535	1209	2	69

Figura 4.23: Cálculos para transformadores. Fonte: Elaborado pelo autor.

Part III - Generators												
HTS Generator BENEFITS												
	TOTAL TWWh (1)	REPLACEMENT TWWh (2)	New TWWh (2)	HTSC % Market Penetration	Annual GWh (2)	Cummul GWh (2)	Energy Savings GWh	Energy Rate (1) Cents/kwh	Annual Benefits (13) \$ thousands	HTSC Cumulative Benefits (14) \$ thousands	Number of Large HTS Generators each year	70% Cap. Factor
163	2002	304	5		0	0	0	15	-	-	0,0	
164	2003	317	6	13	0	0	0	15,15	-	-	0,0	
165	2004	331	6	14	0	0	0	15,30	-	-	0,0	
166	2005	345	6	14	0	0	0	15,45	-	-	0,0	
167	2006	360	6	15	0	0	0	15,60	-	-	0,0	
168	2007	375	7	15	0	0	0	15,75	-	-	0,0	
169	2008	392	7	16	0	0	0	15,90	-	-	0,0	
170	2009	408	7	17	0	0	0	16,05	-	-	0,0	
171	2010	426	8	18	0	0	0	16,20	-	-	0,0	
172	2011	444	8	18	0	0	0	16,35	-	-	0,0	
173	2012	463	8	19	0	0	0	16,50	-	-	0,0	
174	2013	483	9	20	0,0	0	0	16,65	-	-	0,0	
175	2014	504	9	21	0,0	0	0	16,80	-	-	0,0	
176	2015	526	9	22	0,0	0	0	16,95	-	-	0,0	
177	2016	548	10	23	0,0	0	0	17,10	-	-	0,0	
178	2017	572	10	24	0,0	0	0	17,25	-	-	0,0	
179	2018	597	11	25	0,0	0	0	17,40	-	-	0,0	
180	2019	622	11	26	0,0	0	0	17,55	-	-	0,0	
181	2020	649	11	27	0,0	0	0	17,70	-	-	0,0	
182	2021	677	12	28	0,0	0	0	17,85	-	-	0,0	
183	2022	706	12	29	0,0	2	2	18,00	4	4	0,0	
184	2023	736	13	30	0,0	4	6	18,15	12	16	0,0	
185	2024	768	14	32	0,0	6	12	18,30	23	39	0,0	
186	2025	801	14	33	0,0	10	22	18,45	43	82	0,0	
187	2026	836	15	34	0,0	16	39	18,60	74	157	0,0	
188	2027	872	15	36	0,1	26	66	18,75	126	283	0,0	
189	2028	909	16	37	0,1	43	108	18,90	211	493	0,0	
190	2029	948	17	39	0,1	70	178	2	349	842	0,0	
191	2030	989	17	41	0,2	113	290	3	574	1.416	0,1	
192	2031	1031	18	43	0,3	182	473	5	942	2.358	0,1	
193	2032	1076	19	44	0,5	295	767	8	1.541	3.899	0,2	
194	2033	1122	20	46	0,7	476	1243	13	2.515	6.414	0,3	
195	2034	1170	21	48	1,1	768	2008	21	4.066	10.819	0,4	

Figura 4.24: Bloco com dados sobre geradores. Fonte: Elaborado pelo autor.

Part IV - Cables												
HTS Cable BENEFITS												
	TOTAL TWWh (1)	REPLACEMENT TWWh (2)	New TWWh (2)	HTSC % Market Penetration	Annual GWh (2)	Cummul GWh (2)	Loss Savings Cable Total GWh (12)	Energy Rate (1) Cents/kwh	Annual Benefits (13) \$ thousands	HTSC Cumulative Benefits (14) \$ thousands	Number of HTS cables installed each year	HTS cable Capacity installed this year
209	2002	304	0		0	0	0	15	-	-	0	0
210	2003	317	0	13	0	0	0	15,15	-	-	0	0
211	2004	331	1	14	0	0	0	15,30	-	-	0	0
212	2005	345	1	14	0	0	0	15,45	-	-	0	0
213	2006	360	1	15	0	0	0	15,60	-	-	0	0
214	2007	375	1	15	0	0	0	15,75	-	-	0	0
215	2008	392	1	16	0	0	0	15,90	-	-	0	0
216	2009	408	1	17	0	0	0	16,05	-	-	0	0
217	2010	426	1	18	0	0	0	16,20	-	-	0	0
218	2011	444	1	18	0	0	0	16,35	-	-	0	0
219	2012	463	1	19	0	0	0	16,50	-	-	0	0
220	2013	483	1	20	0,0	0	0	16,65	-	-	0	0
221	2014	504	1	21	0,0	0	0	16,80	-	-	0	0
222	2015	526	1	22	0,0	0	0	16,95	-	-	0	0
223	2016	548	1	23	0,0	0	0	17,10	-	-	0	0
224	2017	572	1	24	0,0	0	0	17,25	-	-	0	0
225	2018	597	1	25	0,0	0	0	17,40	-	-	0	0
226	2019	622	1	26	0,0	0	0	17,55	-	-	0	0
227	2020	649	1	27	0,0	0	0	17,70	-	-	0	0
228	2021	677	1	28	0,0	0	0	17,85	1	1	0	0
229	2022	706	1	29	0,0	1	1	18,00	3	4	0	0
230	2023	736	1	30	0,0	2	3	18,15	7	11	0	0
231	2024	768	1	32	0,0	3	6	18,30	15	27	0	0
232	2025	801	1	33	0,0	6	12	18,45	30	57	0	1
233	2026	836	1	34	0,0	11	23	18,60	60	117	0	1
234	2027	872	1	36	0,1	22	45	18,75	118	235	0	3
235	2028	909	1	37	0,1	42	87	18,90	230	464	1	5
236	2029	948	1	39	0,2	81	168	2	446	911	2	10
237	2030	989	2	41	0,4	156	324	5	865	1.776	4	20
238	2031	1031	2	43	0,7	298	622	9	1.673	3.448	7	38
239	2032	1076	2	44	1,2	567	1189	17	3.222	6.671	13	73
240	2033	1122	2	46	2,2	1069	2258	31	6.168	12.838	24	138
241	2034	1170	2	48	4,0	1984	4242	59	11.675	24.514	45	268

Figura 4.25: Bloco de dados da aplicação de cabos. Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o detalhamento da planilha *Database*, devem ser avaliados os resultados, através das planilhas *Results* e *Graphs*. A planilha *Graphs* não apresenta maiores

informações, apenas a geração dos gráficos a partir dos dados da planilha *Results*. Os gráficos que serão apresentados na sequência são oriundos desta planilha.

Na planilha *Results*, os resultados finais do cálculo foram apresentados em formato tabular. A distribuição dos dados apresenta alguma semelhança com a planilha *Database*, estando os dados concentrados na parte superior e do lado esquerdo da planilha, não sendo um formato otimizado para impressão. Do lado esquerdo, são apresentados os resultados por dispositivo, e na sequência, do lado esquerdo, porém abaixo, são calculados o benefício máximo, ou seja, aquele que seria atingido através da instalação imediata de todos os possíveis dispositivos HTS. A parte superior da planilha apresenta os demais resultados, incluindo-se os resultados anuais e acumulados.

Os valores máximos de benefício, para o sistema elétrico brasileiro, a partir do uso de supercondutividade, são apresentados na Figura 4.26, no bloco de dados localizado entre as linhas 328 e 359, anualmente. Coluna A indica o ano, enquanto a economia possível, por dispositivo, é detalhada nas colunas C (motores), D (transformadores), E (geradores) e F (cabos). Estes cálculos máximos são realizados considerando-se a gama de equipamentos que está incluída no escopo da simulação, não representando 100% do sistema elétrico. A coluna G realiza a soma, anual, do benefício de todas as aplicações. Para economia máxima, em dólares, mostrada na Figura 4.27, os valores são calculados a partir das tarifas anuais, definidas na planilha *Database*, e estão apresentados, por aplicação, entre as colunas M e P (motor, transformador, gerador e cabo). A coluna Q calcula o total. Novamente, este resultado deve ser tratado com limitações, pois a estimativa futura, ao envolver taxas de desconto, é mais complexa que a estimativa em energia (Figura 4.26).

328	Benefício Máximo do uso de HTS						
330				Energia - GWh			
331		TOTAL	Motores	Trafos	Geradores	Cabos	Total
332	Ano	TWh (1)					GWh
333							
334	2015	526	136	1.525	5.416	7.309	14.386
335	2016	548	142	1.591	5.649	7.624	15.005
336	2017	572	148	1.659	5.892	7.951	15.650
337	2018	597	154	1.730	6.145	8.293	16.323
338	2019	622	161	1.805	6.410	8.650	17.025
339	2020	649	167	1.882	6.685	9.022	17.757
340	2021	677	175	1.963	6.973	9.410	18.520
341	2022	706	182	2.048	7.273	9.814	19.317
342	2023	736	190	2.136	7.585	10.236	20.147
343	2024	768	198	2.227	7.911	10.677	21.014
344	2025	801	207	2.323	8.252	11.136	21.917
345	2026	836	216	2.423	8.606	11.614	22.860
346	2027	872	225	2.527	8.976	12.114	23.843
347	2028	909	235	2.636	9.362	12.635	24.868
348	2029	948	245	2.749	9.765	13.178	25.937
349	2030	989	255	2.868	10.185	13.745	27.052
350	2031	1031	266	2.991	10.623	14.336	28.216
351	2032	1076	278	3.120	11.080	14.952	29.429
352	2033	1122	289	3.254	11.556	15.595	30.694
353	2034	1170	302	3.394	12.053	16.266	32.014
354	2035	1221	315	3.539	12.571	16.965	33.391
355	2036	1273	328	3.692	13.112	17.695	34.827
356	2037	1328	343	3.850	13.676	18.456	36.324
357	2038	1385	357	4.016	14.264	19.249	37.886
358	2039	1444	373	4.189	14.877	20.077	39.515
359	2040	1506	389	4.369	15.517	20.940	41.214

Figura 4.26: Benefício máximo do uso de matéria HTS, em GWh. Fonte: Elaborado pelo autor.

Economia em milhões de dólares						
Ano	Motores	Trafos	Geradores	Cabos	Total	
2015	23	258	918	1239	2438	
2016	24	272	966	1304	2566	
2017	25	286	1016	1372	2700	
2018	27	301	1069	1443	2840	
2019	28	317	1125	1518	2988	
2020	30	333	1183	1597	3143	
2021	31	350	1245	1680	3306	
2022	33	369	1309	1767	3477	
2023	34	388	1377	1858	3657	
2024	36	408	1448	1954	3845	
2025	38	429	1522	2055	4044	
2026	40	451	1601	2160	4252	
2027	42	474	1683	2271	4470	
2028	44	498	1770	2388	4700	
2029	47	524	1860	2510	4941	
2030	49	551	1956	2639	5194	
2031	51	579	2056	2774	5460	
2032	54	608	2161	2916	5739	
2033	57	639	2271	3064	6031	
2034	60	672	2386	3221	6339	
2035	63	706	2508	3385	6661	
2036	66	742	2635	3557	7000	
2037	69	780	2769	3737	7356	
2038	73	819	2910	3927	7729	
2039	77	861	3057	4126	8120	
2040	80	904	3212	4335	8531	

**Figura 4.27:** Economia máxima, por aplicação, em dólares. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos mostram que os cabos são as aplicações com maior expectativa de benefícios, no período de 2015 até 2040. Este resultado sugere que, provavelmente a aplicação de cabos será também a de penetração mais rápida no período estudado.

As colunas U, V e W apresentam resultados para emissões de gases de efeito estufa evitadas, porém, estes dados não foram tratados nesta análise.

Na parte superior da planilha, à esquerda, está o bloco de dados que informa a estimativa de vendas, em dólares, para cada dispositivo. Pela sequência, a coluna A

informa o ano, e as colunas B, C, D e E trazem as informações de vendas para motores, transformadores, geradores e cabos, respectivamente, como mostra a Figura 4.28. Naturalmente, estes números são consequências de uma série de cálculos, e não devem ser tratados como a “verdade”. Esta previsão é consequência de todas as premissas adotadas ao longo do estudo, e também envolve taxas de desconto, valores presentes e valores futuros, variáveis de estimativa complicada.

The image shows a screenshot of a Microsoft Excel spreadsheet. The title bar reads 'Microsoft Excel - Modelo em atualizacao\_mexendodatabase.xls'. The menu bar includes 'Arquivo', 'Editar', 'Exibir', 'Inserir', 'Formatar', 'Ferramentas', 'Dados', 'Janela', and 'Ajuda'. The toolbar shows various icons for font formatting (Arial, size 10, bold, italic, underline), alignment, and calculation. The spreadsheet content is as follows:

Mercado total para aplicações HTS - Milhares de Dólares					
Ano	Motores	Transformadores	Geradores	Cabos	Total
2015	0	0	0	0	-
2016	0	0	0	0	-
2017	0	0	0	0	-
2018	0	0	0	0	-
2019	0	0	0	0	-
2020	0	0	0	0	-
2021	0	0	0	28	28
2022	0	0	39	49	87
2023	0	0	59	86	145
2024	0	0	91	153	245
2025	0	0	141	276	417
2026	1	0	219	499	718
2027	1	0	344	915	1.261
2028	3	0	535	1.652	2.189
2029	6	273	830	2.975	4.085
2030	15	390	1.286	5.324	7.014
2031	34	566	2.035	9.824	12.459
2032	77	815	3.199	17.813	21.905
2033	175	1.167	5.011	31.723	38.076
2034	397	1.662	7.823	55.194	65.076
2035	891	2.368	12.190	93.547	108.996
2036	1.951	3.364	18.918	151.306	175.540
2037	4.071	4.777	29.195	229.689	267.732
2038	7.773	6.799	44.658	322.539	381.770
2039	12.993	9.705	67.370	416.875	506.943
2040	18.611	13.877	99.521	500.067	632.076

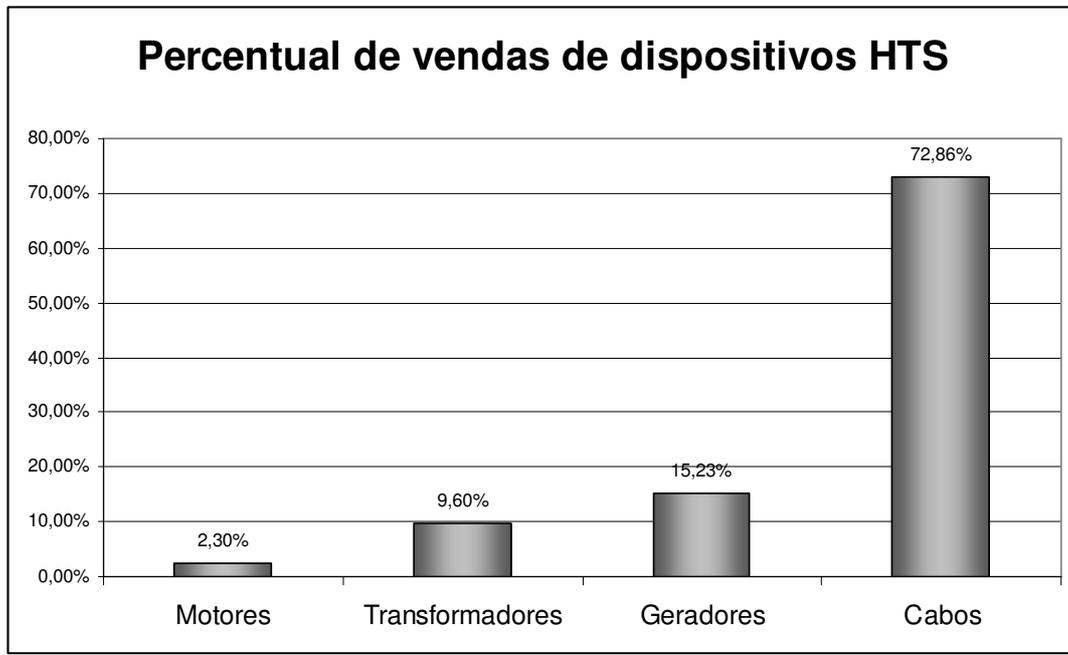
The spreadsheet interface includes a status bar at the bottom with 'Pronto' and a navigation pane showing 'RESULTS', 'Graphs', 'ASSUMPTIONS', and 'DATABASE'.

**Figura 4.28:** Mercado para aplicações de material HTS ao longo do tempo. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

De acordo com o cenário montado para simulação, e considerando-se a evolução tecnológica prevista, a aplicação de cabos, para o estudo de caso brasileiro, apresenta os valores de venda maiores no período compreendido entre 2015 e 2040. Fazendo o

cálculo da porcentagem de vendas de cada dispositivo, montou-se o gráfico mostrado na Figura 4.29.

A seguir, os resultados para vendas de fios HTS, em milhares de dólares, são apresentados entre as linhas 43 e 70, como mostrado na Figura 4.30.



**Figura 4.29:** Percentual de vendas, de cada aplicação, de 2015 até 2040. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

43	Mercado para fios HTS - milhares de dólares					
44	Ano	Motores	Transformadores	Geradores	Cabos	Total
45	2015	0	-	-	-	-
46	2016	0	-	-	-	-
47	2017	0	-	-	-	-
48	2018	0	-	-	-	-
49	2019	0	-	-	-	-
50	2020	0	-	-	-	-
51	2021	0	-	-	22	22
52	2022	0	-	22	38	60
53	2023	0	-	32	66	98
54	2024	0	-	47	114	162
55	2025	0	-	70	201	271
56	2026	0	-	104	355	458
57	2027	0	-	157	639	796
58	2028	1	-	233	1.123	1.356
59	2029	2	94	343	1.965	2.404
60	2030	3	126	502	3.404	4.035
61	2031	7	178	774	6.209	7.167
62	2032	15	248	1.175	11.105	12.543
63	2033	33	342	1.772	19.561	21.709
64	2034	71	472	2.661	33.838	37.043
65	2035	151	652	3.988	57.025	61.817
66	2036	314	903	5.971	92.288	99.476
67	2037	623	1.257	8.923	140.742	151.545
68	2038	1.141	1.759	13.278	198.760	214.938
69	2039	1.840	2.473	19.582	258.088	281.984
70	2040	2.562	3.489	28.413	310.437	344.902
71						

**Figura 4.30:** Dados de vendas de fios HTS. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Como consequência da penetração maior do uso de cabos supercondutores, estes então são o maior mercado para aplicações dos fios HTS, até 2040.

A venda de sistemas de criogenia, para aplicação nos dispositivos supercondutores, é mostrada na planilha entre as linhas 73 e 100, como apresenta a Figura 4.31.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

Ano	Motores	Transformadores	Geradores	Cabos	Total
2015	0	-	-	-	-
2016	0	-	-	-	-
2017	0	-	-	-	-
2018	0	-	-	-	-
2019	0	-	-	-	-
2020	0	-	-	-	-
2021	0	-	-	4	4
2022	0	-	1	7	8
2023	0	-	2	13	16
2024	0	-	3	26	29
2025	0	-	6	50	55
2026	0	-	9	96	105
2027	0	-	15	184	198
2028	0	-	24	352	376
2029	0	62	38	672	772
2030	0	91	61	1.274	1.427
2031	1	132	96	2.387	2.617
2032	3	188	150	4.382	4.723
2033	6	263	229	7.796	8.293
2034	14	357	338	13.296	14.005
2035	32	486	499	22.051	23.067
2036	70	644	716	34.176	35.606
2037	148	843	1.006	49.019	51.016
2038	284	1.105	1.401	64.813	67.603
2039	477	1.465	1.950	79.401	83.294
2040	687	1.979	2.709	91.432	96.806

**Figura 4.31:** Mercado estimado para sistemas de criogenia. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

O resultado, em dólares, mostra-se coerente com o obtido até aqui, ou seja, uma aplicação crescente de cabos HTS no sistema elétrico brasileiro.

Estas estimativas de vendas, tanto para as aplicações de supercondutividade, como também para a venda de fios e sistemas de criogenia, são informações importantes para fabricantes e investidores. Por exemplo, a empresa WEG já possui conhecimento para fabricação de motores supercondutores, porém, tem necessidade real de estimar o mercado consumidor para iniciar a fabricação e venda [114].

A relação custo benefício esperada para cada aplicação está mostrada do lado esquerdo da planilha “Results”, e está separada por aplicações. A aplicação de motores está situada entre as linhas 128 e 153; para transformadores, entre as linhas 162 e 187; para geradores, entre 196 e 221; para cabos, entre as linhas 229 e 254.

Para cada um dos blocos, apresentado respectivamente na Figura 4.32, Figura 4.33, Figura 4.34 e Figura 4.35, a ordem segue a seguinte lógica: coluna A informa o ano, coluna B é o valor presente devido a energia economizada pelo equipamento HTS, a coluna C mostra o número de quilômetros necessários, e o custo do mesmo na coluna D. O custo da criogenia vem na coluna E, e o número de motores (da potência “média”) está mostrado na coluna F. A coluna G envolve o custo adicional para construção de um motor HTS.

Após a realização dos cálculos, e comparando o custo de fabricação de ambos os motores, o resultado é apresentado na coluna J.

A coluna J é calculada a partir da subtração  $I - H$ . A coluna H envolve o custo necessário para construir os dispositivos necessários empregando tecnologia convencional. A coluna I envolve não apenas o custo de fabricação para os dispositivos HTS, mas também o quanto eles podem economizar, quando comparados a tecnologia convencional.

Por conta da parcela econômica combinada com o custo de fabricação, na coluna I, observa-se a presença de alguns valores negativos. Isto não indica que o custo de fabricação seja negativo, mas indica que, mesmo com o custo adicional de fabricação dos dispositivos HTS quando comparados a tecnologia convencional, a custo econômico evitado com a diminuição de perdas justifica o uso de supercondutores.

Este cenário, de valores negativos na construção/operação dos dispositivos HTS, não se verificou no estudo de caso norte-americano, e após uma análise do cenário traçado para o caso brasileiro, mostrou uma diferença que pesou consideravelmente nos resultados: a tarifa de energia elétrica, que no caso brasileiro, chega a ser cinco vezes maior que a tarifa norte-americana.

De acordo com [14], os principais fatores que influenciam na aplicação dos materiais supercondutores: o custo de fabricação dos fios HTS e o custo dos sistemas de criogenia, necessários a operação dos mesmos. Entretanto, após esta análise, infere-se que, localmente, em cada mercado, a tarifa pode influenciar positivamente a entrada dos equipamentos supercondutores. Ampliando-se a idéia, o aumento dos custos de geração de energia elétrica é um fator que pesa favoravelmente ao uso de supercondutores.

Uma limitação do modelo diz respeito ao custo de fabricação adicional, atribuído aos equipamentos HTS. O modelo não prevê redução neste custo. A redução poderia ser atribuída ao aprendizado adquirido ao longo do tempo. Um modelo de aprendizado poderia ser ajustado para os valores da coluna G.

Continuando a análise dos dados da planilha *Results*, voltando a parte superior da planilha, porém buscando dados mais a direita, são identificados blocos de dados relativos a economia obtida através do uso de dispositivos HTS.

Entre as colunas L e Q, a economia de energia, em GWh, é mostrada, separadamente por aplicação e totalizada, como mostra a Figura 4.36. Os dados são acumulados, ou seja, o dispositivo que é instalado em determinado ano, apresentará economia também nos anos seguintes.

Year	Economia dos motores em valor presente	Quantidade de fio necessário (km)	Custo fio HTS \$(thousands)	Custo Criogenia \$(thousands)	No. of Motors 746 kW = Avg. Size	Incremental cost to build HTS Motor \$/motor	Custo Total Motores HTS	Custo Motores Convencionais	Economia HTS vs. convencional
2015	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2016	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2017	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2018	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2019	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2020	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2021	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2022	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2023	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2024	-	-	-	-	-	75	-	0	-
2025	0	0	0	0	0	75	0	0	0
2026	0	0	0	0	0	75	0	1	1
2027	1	0	0	0	0	75	0	2	2
2028	3	0	1	0	0	75	(0)	4	4
2029	6	0	2	0	0	75	(0)	9	9
2030	14	0	3	0	0	75	(1)	21	22
2031	33	0	7	1	0	75	(3)	50	52
2032	76	0	15	2	1	75	(6)	115	122
2033	176	1	33	5	2	75	(20)	265	285
2034	406	2	71	12	4	75	(54)	608	662
2035	925	5	151	27	8	75	(136)	1.380	1.516
2036	2.053	11	314	60	18	75	(327)	3.055	3.383
2037	4.333	22	623	127	38	75	(737)	6.432	7.169
2038	8.352	43	1.141	245	73	75	(1.491)	12.375	13.866
2039	14.062	72	1.840	412	123	75	(2.603)	20.807	23.410
2040	20.249	103	2.562	592	178	75	(3.846)	29.942	33.788
2041									
2042									
2043									
2044									
2045					445				

Figura 4.32: Resultados para motores. Fonte: Elaborado pelo autor.

Microsoft Excel - Modelo em atualizacao\_mexendodatabase.xls

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Digite uma pergunta

B189

156	Transformadores									
157										
158					194,0					
159					Cryo. Invest.	No. of Xfmrs.	Incremental cost	Total cost of	Alternative	Savings
160		PV of Savings \$10^3	Kilometers of	\$*10^3	In Xfmrs.	avg size, MVA =	to build HTS XFMR	HTS xfmrs.	Conventional	
161	Year	Transformer Savings	HTS Wire Req'd	HTS Wire Cost	\$*10^3	220	\$/xfmr	\$*10^3	XFMR Cost	\$ thousands
162	2015	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
163	2016	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
164	2017	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
165	2018	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
166	2019	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
167	2020	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
168	2021	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
169	2022	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
170	2023	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
171	2024	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
172	2025	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
173	2026	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
174	2027	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
175	2028	-	-	-	-	-	2640000	-	-	-
176	2029	377	2	94	62	0	2640000	634	1.426	792
177	2030	562	3	126	91	0	2640000	923	2.114	1.190
178	2031	835	4	178	132	1	2640000	1.354	3.132	1.779
179	2032	1.242	6	248	188	1	2640000	1.978	4.640	2.662
180	2033	1.845	9	342	263	2	2640000	2.882	6.871	3.988
181	2034	2.738	14	472	357	2	2640000	4.192	10.167	5.976
182	2035	4.059	20	652	486	3	2640000	6.098	15.032	8.934
183	2036	6.008	30	903	644	5	2640000	8.858	22.197	13.339
184	2037	8.871	45	1.257	843	7	2640000	12.859	32.718	19.858
185	2038	13.063	66	1.759	1.104	11	2640000	18.664	48.106	29.442
186	2039	19.158	96	2.473	1.465	16	2640000	27.070	70.484	43.414
187	2040	27.949	140	3.489	1.978	23	2640000	39.183	102.775	63.592
188										
189						73				

Página 4

Pronto

Figura 4.33: Resultados para transformadores. Fonte: Elaborado pelo autor.

Microsoft Excel - Modelo em atualizacao\_mexendodatabase.xls

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Digite uma pergunta

B223

190	Geradores									
191										
192										
193										
194		Pres. Val. in \$*10^3	Kilometers of	\$*10^3	Cryo. Invest.	No. of Gens.	Incremental cost	Total cost of	Alternative	Savings
195	Year	Gen. Savings	HTS Wire Req'd	HTS Wire Cost	In Gens.	250	to build HTS Gens.	HTS Gens.	Conventional	
196	2015	-	-	-	-	-	10.000	-	-	-
197	2016	-	-	-	-	-	10.000	-	-	-
198	2017	-	-	-	-	-	10.000	-	-	-
199	2018	-	-	-	-	-	10.000	-	-	-
200	2019	-	-	-	-	-	10.000	-	-	-
201	2020	-	-	-	-	-	10.000	-	-	-
202	2021	-	-	-	-	-	10.000	-	-	-
203	2022	63	0	22	1	0,00	10.000	(23)	37	60
204	2023	103	1	32	2	0,00	10.000	(42)	60	102
205	2024	168	1	47	4	0,00	10.000	(74)	97	171
206	2025	274	1	70	6	0,01	10.000	(129)	157	286
207	2026	447	2	104	10	0,01	10.000	(221)	254	475
208	2027	728	3	157	16	0,02	10.000	(372)	412	784
209	2028	1.186	5	233	25	0,03	10.000	(631)	668	1.299
210	2029	1.930	8	343	40	0,05	10.000	(1.065)	1.082	2.147
211	2030	3.138	11	502	64	0,08	10.000	(1.793)	1.752	3.546
212	2031	5.099	19	774	102	0,13	10.000	(2.963)	2.836	5.799
213	2032	8.275	30	1.175	159	0,20	10.000	(4.903)	4.585	9.488
214	2033	13.404	48	1.772	242	0,33	10.000	(8.100)	7.402	15.502
215	2034	21.654	78	2.661	359	0,53	10.000	(13.336)	11.922	25.258
216	2035	34.844	125	3.988	529	0,85	10.000	(21.824)	19.132	40.956
217	2036	55.742	200	5.971	759	1,36	10.000	(35.440)	30.536	65.976
218	2037	88.406	317	8.923	1.066	2,15	10.000	(56.933)	48.339	105.271
219	2038	138.460	495	13.278	1.486	3,36	10.000	(90.099)	75.695	165.694
220	2039	212.989	761	19.582	2.067	5,16	10.000	(139.710)	116.168	255.878
221	2040	319.582	1.141	28.413	2.871	7,74	10.000	(210.869)	174.215	385.084
222										
223						22				

Página 5

Pronto

Figura 4.34: Resultados para geradores. Fonte: Elaborado pelo autor.

Microsoft Excel - Modelo em atualizacao\_mexendodatabase.xls

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Digite uma pergunta

B257

Year	Pres. Val. in \$*10^3	Kilometers of HTS Wire Req'd	HTS Wire Cost \$*10^3	HTS Crpo Cost \$*10^3	Miles of Cable	Incremental cost \$*10^3/Mile	Total cost of HTS Cable \$*10^3	Alternative Conventional Xmsn. Cost	Savings \$ thousands
2015	-	-	-	-	-	-	210	-	-
2016	-	-	-	-	-	-	210	-	-
2017	-	-	-	-	-	-	210	-	-
2018	-	-	-	-	-	-	210	-	-
2019	-	-	-	-	-	-	210	-	-
2020	-	-	-	-	-	-	210	-	-
2021	16	0	22	4	0,0	210	12	31	19
2022	31	1	38	7	0,0	210	18	59	41
2023	60	1	66	13	0,0	210	27	114	87
2024	116	2	114	26	0,1	210	39	219	180
2025	224	4	201	50	0,1	210	55	422	367
2026	434	8	355	96	0,3	210	71	811	741
2027	839	13	639	184	0,5	210	88	1.561	1.474
2028	1.622	24	1.123	352	1,0	210	54	3.004	2.950
2029	3.131	43	1.965	672	1,8	210	(108)	5.773	5.881
2030	6.033	78	3.404	1.274	3,5	210	(615)	11.077	11.693
2031	11.588	149	6.209	2.387	6,7	210	(1.580)	21.196	22.776
2032	22.140	284	11.105	4.381	12,8	210	(3.965)	40.351	44.316
2033	41.897	535	19.561	7.794	24,1	210	(9.469)	76.107	85.576
2034	77.970	993	33.838	13.291	44,8	210	(21.427)	141.215	162.642
2035	141.057	1.792	57.025	22.042	80,9	210	(45.004)	254.810	299.814
2036	243.904	3.092	92.268	34.161	139,5	210	(88.150)	439.609	527.759
2037	394.726	4.995	140.742	48.995	225,3	210	(157.651)	710.134	867.786
2038	586.696	7.413	198.760	64.778	334,4	210	(252.899)	1.053.994	1.306.893
2039	794.614	10.030	258.068	79.353	452,5	210	(362.109)	1.426.112	1.788.221
2040	988.361	12.470	310.437	91.366	562,6	210	(468.374)	1.772.932	2.241.306

Página 6

RESULTS / Graphs / ASSUMPTIONS / DATABASE /

Pronto

Figura 4.35: Resultados para cabos. Fonte: Elaborado pelo autor.

Microsoft Excel - Modelo em atualizacao\_mexendodatabase.xls

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

Q40 =+M40+N40+O40+P40

	K	L	M	N	O	P	Q
12							
13				<b>Economia de Energia - GWh</b>			
14		Ano	Motores	Transformadores	Geradores	Cabos	Total
15		2015	0	0	0	0	0
16		2016	0	0	0	0	0
17		2017	0	0	0	0	0
18		2018	0	0	0	0	0
19		2019	0	0	0	0	0
20		2020	0	0	0	0	0
21		2021	0	0	0	0	0
22		2022	0	0	0	0	0
23		2023	0	0	0	0	0
24		2024	0	0	0	0	0
25		2025	0	0	0	0	0
26		2026	0	0	0	0	1
27		2027	0	0	1	1	1
28		2028	0	0	1	1	2
29		2029	0	0	2	2	4
30		2030	0	0	3	5	8
31		2031	0	1	5	9	14
32		2032	0	1	8	17	26
33		2033	0	2	13	31	46
34		2034	0	3	21	59	83
35		2035	1	4	33	109	147
36		2036	2	6	54	195	256
37		2037	4	9	86	333	432
38		2038	8	14	136	539	697
39		2039	15	21	212	818	1066
40		2040	25	30	328	1164	1547
41							

RESULTS / Graphs / ASSUMPTIONS / DATABASE /

Pronto

**Figura 4.36:** Economia de energia, em GWh. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Continuando, a direita da planilha, na parte superior, entre as colunas S e Y, A economia de energia, apresentada em GWh nos dados anterior, é obtida em dólares, multiplicando-se o valor em GWh pela tarifa. Os resultados são mostrados na Figura 4.37.

A Figura 4.38 mostra um gráfico com o custo de energia acumulado no decorrer dos anos, até 2040.

Custos de energia evitados em milhões de dólares						
Ano	Motores	Transformadores	Geradores	Cabos	Total	Acumulado
2015	-	-	-	-	-	-
2016	-	-	-	-	-	-
2017	-	-	-	-	-	-
2018	-	-	-	-	-	-
2019	-	-	-	-	-	-
2020	-	-	-	-	-	-
2021	-	-	-	0	0	0
2022	-	-	0	0	0	0
2023	-	-	0	0	0	0
2024	-	-	0	0	0	0
2025	0	-	0	0	0	0
2026	0	-	0	0	0	0
2027	0	-	0	0	0	1
2028	0	-	0	0	0	1
2029	0	0	0	0	1	2
2030	0	0	1	1	2	3
2031	0	0	1	2	3	6
2032	0	0	2	3	5	11
2033	0	0	3	6	9	20
2034	0	1	4	12	16	36
2035	0	1	7	22	29	66
2036	0	1	11	39	51	117
2037	1	2	17	67	87	205
2038	2	3	28	110	142	347
2039	3	4	44	168	219	566
2040	5	6	68	241	320	886

**Figura 4.37:** Custos de energia evitados, em milhões de dólares. **Fonte:** Elaborado pelo autor.



**Figura 4.38:** Gráfico dos custos de energia evitados. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Comparando-se os dados da energia economizada, com o valor possível, pode-se observar que o potencial de economia de energia com materiais supercondutores é grande. Estes dados estão repetidos nas colunas X, A e ZZ, entre as linhas 15 e 40, e são mostrados novamente na Tabela 4.19 e na Figura 4.39.

Observa-se que o percentual sofre aumento especialmente nos 10 últimos anos desta análise. Isto é reflexo de uma percepção sobre o futuro da supercondutividade, embora promissor, possa estar no futuro, um pouco mais a frente. Porém, ao mesmo tempo, convém lembrar que este é um cenário obtido a partir de dados atuais. A incerteza sobre os resultados obtidos na análise aumenta proporcionalmente ao tempo. Uma descontinuidade tecnológica, levando a redução de custos das fitas, por exemplo, poderia abreviar muitos anos. Uma prática interessante é revisar este estudo periodicamente, ao longo dos anos, visando capturar estas descontinuidades, e consequentemente reduzindo a incerteza sobre os resultados.

Também deve ser observado que, a obtenção de valores apresenta muitas fontes de incerteza, como por exemplo, valor futuro das tarifas de energia, taxas de desconto adotadas e ainda a correlação entre valores futuros e valores presentes. Embora resultados tenham sido apresentados, neste estudo, envolvendo recursos financeiros, estes devem ser considerados com cautela.

**Tabela 4.19.** Percentual dos custos evitados, em relação aos valores máximos possíveis.

<b>Ano</b>	<b>Custos evitados (milhões de dólares)</b>	<b>Custos evitados máximos possíveis</b>	<b>Percentual</b>
2015	0	0	0
2016	0	0	0
2017	0	0	0
2018	0	0	0
2019	0	0	0
2020	0	0	0
2021	0	0	0
2022	0	0	0
2023	0	0	0
2024	0	0	0
2025	0	0	0
2026	0	0	0
2027	0	1	0
2028	0	1	0
2029	1	2	0
2030	2	3	0
2031	3	6	0,1
2032	5	11	0,1
2033	9	20	0,2
2034	16	36	0,3
2035	29	66	0,4
2036	51	117	0,7
2037	87	205	1,2
2038	142	347	1,8
2039	219	566	2,7
2040	320	886	3,8

**Fonte:** Elaborado pelo autor.



**Figura 4.39:** Percentual do potencial de economia capturado até 2040. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Com respeito à venda de equipamentos, o modelo realiza o tratamento para um valor médio, ou seja, os comparativos realizados anteriormente cedem os valores médios obtidos ao modelo, de modo que os dados calculados informam, por exemplo, no caso brasileiro, o número de geradores de 250 MVA a serem instalados. Estes dados, no caso do modelo, estão situados entre as linhas 10 e 40, entre as colunas AC e AG, como mostra a Figura 4.40.

Já a demanda esperada por fios HTS, em quilômetros por ano, é mostrada na Figura 4.41 Este resultado é apresentado também sob forma de gráfico, na Figura 4.42. Esta representação de demanda considera o uso de fios de 1 mm<sup>2</sup> de secção, e com capacidade de corrente mais elevada que a atual, conforme estabelecido nas premissas do estudo.

Microsoft Excel - Modelo em atualizacao\_mexendodatabase.xls

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

Arial 10 N I S %

AD40 =+DATABASEIS59+DATABASEIW107

	AC	AD	AE	AF	AG
10		<b>Unidades</b>			
11					
12					
13		748 kW	225 MVA	250 MVA	Milhas de
14	Ano	Motores	Transformadores	Geradores	Cabos
15	2015	-	-	-	-
16	2016	-	-	-	-
17	2017	-	-	-	-
18	2018	-	-	-	-
19	2019	-	-	-	-
20	2020	-	-	-	-
21	2021	-	-	-	0
22	2022	-	-	0	0
23	2023	-	-	0	0
24	2024	-	-	0	0
25	2025	0	-	0	0
26	2026	0	-	0	0
27	2027	0	-	0	0
28	2028	0	-	0	1
29	2029	0	0	0	2
30	2030	0	0	0	4
31	2031	0	1	0	7
32	2032	1	1	0	13
33	2033	2	2	0	24
34	2034	4	2	1	45
35	2035	8	3	1	81
36	2036	18	5	1	139
37	2037	38	7	2	225
38	2038	73	11	3	334
39	2039	123	16	5	453
40	2040	178	23	8	563
41					

RESULTS / Graphs / ASSUMPTIONS / DATA

Pronto

**Figura 4.40:** Mercado esperado para as quatro aplicações. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Microsoft Excel - Modelo em atualizacao\_mexendodatabase.xls

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda

Arial 10 N I S

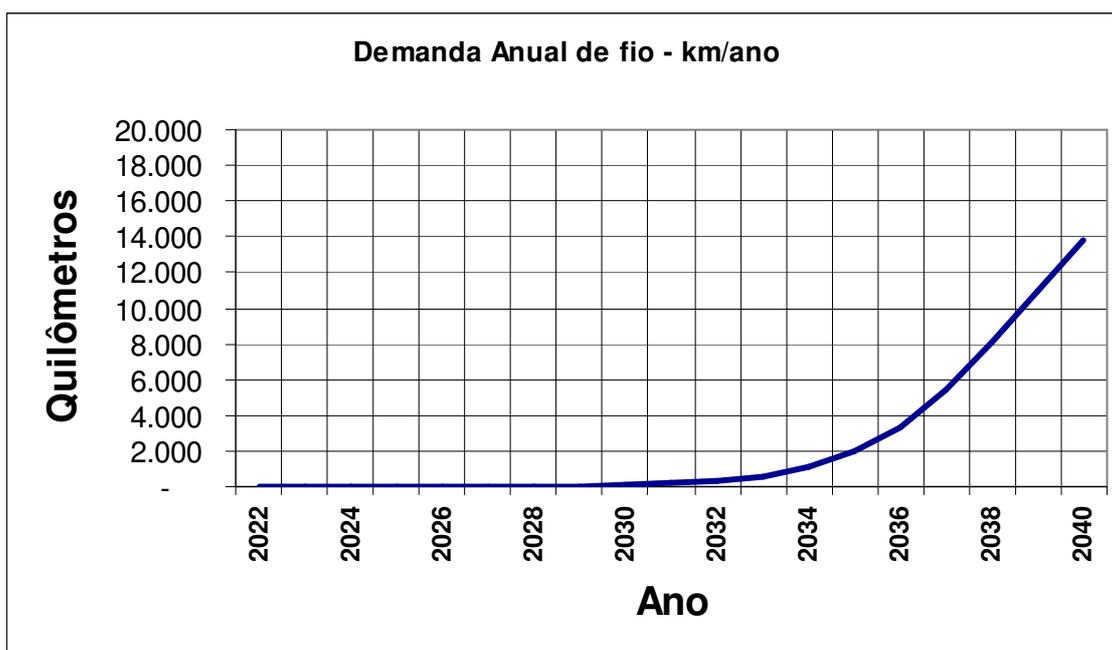
AK40 =+ASSUMPTIONS!\$Q40\*DATABASEIL154

	AI	AJ	AK	AL	AM	AN
10						
11	<b>Demanda de fios HTS em km/ano</b>					
12						
13						
14		Motores	nsformadores	Geradores	Cabos	Total
15	2015	-	-	-	-	-
16	2016	-	-	-	-	-
17	2017	-	-	-	-	-
18	2018	-	-	-	-	-
19	2019	-	-	-	-	-
20	2020	-	-	-	-	-
21	2021	-	-	-	0	0
22	2022	-	-	0	1	1
23	2023	-	-	1	1	2
24	2024	-	-	1	2	3
25	2025	0	-	1	4	6
26	2026	0	-	2	8	10
27	2027	0	-	3	13	17
28	2028	0	-	5	24	29
29	2029	0	2	8	43	53
30	2030	0	3	11	78	92
31	2031	0	4	19	149	172
32	2032	0	6	30	284	321
33	2033	1	9	48	535	594
34	2034	2	14	78	993	1.087
35	2035	5	20	125	1.792	1.943
36	2036	11	30	200	3.092	3.333
37	2037	22	45	317	4.995	5.378
38	2038	43	66	495	7.413	8.016
39	2039	72	96	761	10.030	10.959
40	2040	103	140	1.141	12.470	13.854
41						

RESULTS / Graphs / ASSUMPTIONS / D:

Pronto

**Figura 4.41:** Demanda de fio HTS, por ano. **Fonte:** Elaborado pelo autor.



**Figura 4.42:** Gráfico da demanda anual de fios HTS. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Após a realização de toda a avaliação, a Figura 4.36 apresentou os ganhos obtidos, caso todas as premissas e estimativas realizadas venham a concretizar-se. As perdas evitadas, para os últimos 11 anos da simulação, estão sumarizadas na Tabela 4.20.

**Tabela 4.20.** Economia de energia obtida anualmente (GWh).

Ano	Motores	Transformadores	Geradores	Cabos	Total
2030	0	0	3	5	8
2031	0	1	5	9	14
2032	0	1	8	17	26
2033	0	2	13	31	46
2034	0	3	21	59	83
2035	1	4	33	109	147
2036	2	6	54	195	256
2037	4	9	86	333	432
2038	8	14	136	539	697
2039	15	21	212	818	1066
2040	25	30	328	1164	1547

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Outra maneira de expressar os resultados, baseada em [14], pode ser realizada com base em localidades equivalentes que poderiam ser supridas por esta energia.

Para realizar este estudo, foram consultados o balanço energético do estado do Rio de Janeiro 2009 [115], o Armazém de dados do PortalGeo, que reúne na internet mapeamentos digitais e bases de dados diversas acerca do município do Rio de Janeiro [116]. Entre as bases de dados, foi localizado o “Consumo total, médio anual, mensal e diário de energia elétrica por habitante - Município do Rio de Janeiro - 1980 – 2010”. Através destes dados, foi possível levantar o valor médio de 2,3 MWh anual para cada habitante do município do Rio de Janeiro.

O balanço energético do estado do Rio de Janeiro permitiu investigar estes dados não para o município, mas sim para todo o estado, e assim foi montada a **Tabela 4.21**.

**Tabela 4.21.** Consumo médio de energia elétrica por habitante.

<b>Localidade</b>	<b>Consumo de energia elétrica (MWh)</b>	<b>População (habitantes)</b>	<b>Média de consumo (MWh/habitante)</b>
Município do Rio de Janeiro	14.511.867	6.320.446	2,30
Estado do Rio de Janeiro	38.944.000	15.993.583	2,43

**Fonte:** Elaborado pelo autor, baseado nas referências [115, 116].

Observa-se que o consumo médio do estado do Rio de Janeiro é bastante próximo àquele do Município do Rio de Janeiro. Deste modo, pode-se realizar uma aproximação, para outros municípios do estado, deste mesmo valor médio. Conhecida a população de cada município, pode-se realizar uma estimativa acerca do consumo de eletricidade de cada um deles.

Naturalmente, todos os municípios apresentam estruturas, atividades econômicas e consumo energético diferenciado, o que pode ser evidenciado mesmo no Balanço Energético do estado. Para realizar uma análise mais detalhada sobre o consumo de eletricidade de cada município, com maior exatidão, o método mais adequado seria a utilização de dados mais específicos. Porém esta análise não está no foco deste estudo, e

os dados a serem obtidos aqui serão usados apenas de uma forma ilustrativa, visando ampliar o entendimento acerca da energia economizada.

Assim, consultando-se o censo populacional do ano de 2010, realizado pelo IBGE [117], foi possível identificar a população de cada um dos municípios do Rio de Janeiro. Adotando-se o valor de 2,3 MWh por habitante, estimou-se o consumo de energia elétrica de cada município. Os dados consolidados, para estas estimativas, estão apresentados na Tabela 4.22. Os municípios estão classificados em ordem decrescente de população.

**Tabela 4.22.** Estimativa do consumo anual de energia elétrica por município do estado do Rio de Janeiro - 2010.

<b>Município</b>	<b>População</b>	<b>Consumo anual (GWh)</b>
Rio de Janeiro	6.323.037	14.543
São Gonçalo	1.008.064	2.319
Duque de Caxias	855.046	1.967
Nova Iguaçu	795.212	1.829
Niterói	487.397	1.121
Belford Roxo	469.261	1.079
Campos dos Goytacazes	463.545	1.066
São João de Meriti	459.356	1.057
Petrópolis	296.044	681
Volta Redonda	257.996	593
Magé	228.150	525
Itaboraí	218.090	502
Macaé	206.748	476
Cabo Frio	186.222	428
Nova Friburgo	182.016	419
Barra Mansa	177.861	409
Angra dos Reis	169.270	389
Mesquita	168.403	387
Teresópolis	163.805	377
Nilópolis	157.483	362

Queimados	137.938	317
Maricá	127.519	293
Resende	119.801	276
Araruama	112.098	258
Itaguaí	109.163	251
Rio das Ostras	105.757	243
Itaperuna	95.876	221
Japeri	95.931	221
Barra do Piraí	94.855	218
São Pedro da Aldeia	88.013	202
Seropédica	78.183	180
Três Rios	77.503	178
Saquarema	74.221	171
Valença	71.894	165
Rio Bonito	55.586	128
Cachoeiras de Macacu	54.370	125
Guapimirim	51.487	118
Paracambi	47.074	108
São Francisco de Itabapoana	41.357	95
Paraíba do Sul	41.088	95
Santo Antônio de Pádua	40.569	93
Paraty	37.575	86
São Fidélis	37.553	86
Mangaratiba	36.311	84
Bom Jesus do Itabapoana	35.384	81
Casimiro de Abreu	35.373	81
Vassouras	34.439	79
São João da Barra	32.767	75
Tanguá	30.731	71
Itatiaia	28.852	66
Arraial do Cabo	27.770	64
Armação dos Búzios	27.538	63

Miracema	26.829	62
Paty do Alferes	26.831	62
Pirai	26.309	61
Bom Jardim	25.398	58
Mendes	24.940	57
Miguel Pereira	24.647	57
Itaocara	22.902	53
Iguaba Grande	22.858	53
Pinheiral	22.724	52
Silva Jardim	21.360	49
Conceição de Macabu	21.200	49
Cordeiro	20.403	47
São José do Vale do Rio Preto	20.252	47
Quissamã	20.244	47
Cantagalo	19.826	46
Porciúncula	17.771	41
Sapucaia	17.504	40
Carmo	17.439	40
Rio Claro	17.401	40
Porto Real	16.574	38
Natividade	15.077	35
Sumidouro	14.920	34
Cambuci	14.829	34
Italva	14.027	32
Carapebus	13.348	31
Engenheiro Paulo de Frontin	13.239	30
Quatis	12.831	30
Cardoso Moreira	12.540	29
Areal	11.421	26
Duas Barras	10.933	25
Santa Maria Madalena	10.321	24

Trajano de Moraes	10.281	24
Aperibé	10.215	23
Varre-Sai	9.503	22
São Sebastião do Alto	8.906	20
Rio das Flores	8.545	20
Comendador Levy Gasparian	8.183	19
Laje do Muriaé	7.491	17
São José de Ubá	7.003	16
Macuco	5.269	12

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base na referência [117] e na Tabela 4.21.

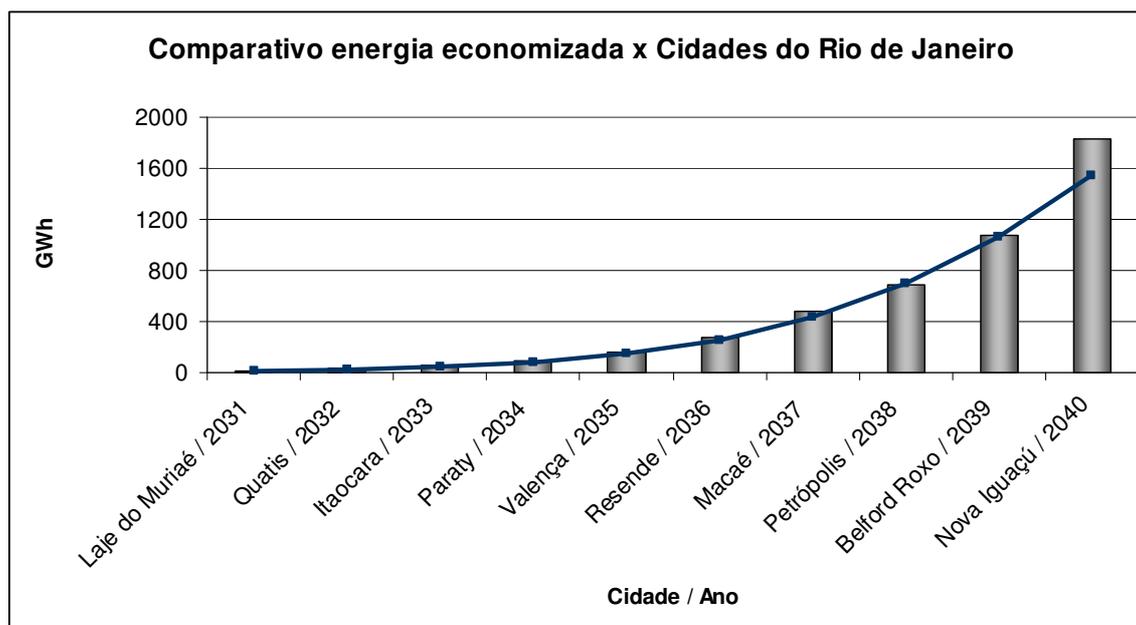
Os resultados mostram que, a economia trazida pelos dispositivos HTS em 2030 não é suficiente para uma cidade, por exemplo. Porém, na década de 2030 a 2040, a economia viabilizada pode ser suficiente para suprir a demanda de um município de 500.000 habitantes, hoje esta faixa estaria entre os municípios de Niterói e Nova Iguaçu. Na tabela 22, foram escolhidas 10 cidades, com consumo de energia estimado próximo a energia que pode ser economizada, com base no cenário deste estudo. O resultado também é apresentado sob forma de um gráfico, na Figura 4.43, onde as barras representam o consumo das cidades e a linha mostra a energia economizada com aplicação de dispositivos HTS.

**Tabela 4.23.** Comparação entre municípios e energia economizada.

Dados dos Municípios			Dados HTS	
Município	População	Consumo Estimado (GWh)	Ano	Energia economizada HTS (GWh)
Laje do Muriaé	7.491	17	2031	8
Quatis	12.831	30	2032	14
Itaocara	22.902	53	2033	26
Paraty	37.575	86	2034	46
Valença	71.894	165	2035	83
Resende	119.801	276	2036	147

Macaé	206.748	476	2037	256
Petrópolis	296.044	681	2038	432
Belford Roxo	469.261	1.079	2039	697
Nova Iguaçu	795.212	1.829	2040	1066

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base na Tabela 4.20 e Tabela 4.22.



**Figura 4.43:** Energia disponível para consumo, comparada com municípios do Rio de Janeiro. **Fonte:** Elaborado pelo autor.

Admitindo-se uma comparação realizada pelo número de habitantes, também poderia ser considerada uma análise das capitais brasileiras. A população das mesmas, para o ano de 2010, está disponível através dos dados do censo do IBGE [117], e está apresentada na Tabela 4.24.

**Tabela 4.24.** População das capitais brasileiras no ano de 2010.

Classificação	Nome	Número de Habitantes
01 <sup>a</sup>	São Paulo	10.659.386
02 <sup>a</sup>	Rio de Janeiro	5.940.224
03 <sup>a</sup>	Salvador	2.480.790
04 <sup>a</sup>	Brasília	2.469.489
05 <sup>a</sup>	Fortaleza	2.315.116

06 <sup>a</sup>	Belo Horizonte	2.258.096
07 <sup>a</sup>	Manaus	1.718.584
08 <sup>a</sup>	Curitiba	1.678.965
09 <sup>a</sup>	Recife	1.472.202
10 <sup>a</sup>	Porto Alegre	1.365.039
11 <sup>a</sup>	Belém	1.351.618
12 <sup>a</sup>	Goiânia	1.256.514
13 <sup>a</sup>	São Luis	966.989
14 <sup>a</sup>	Maceió	917.086
15 <sup>a</sup>	Teresina	797.029
16 <sup>a</sup>	Natal	785.722
17 <sup>a</sup>	Campo Grande	766.461
18 <sup>a</sup>	João Pessoa	716.042
19 <sup>a</sup>	Aracaju	552.365
20 <sup>a</sup>	Cuiabá	530.308
21 <sup>a</sup>	Florianópolis	424.224
22 <sup>a</sup>	Porto Velho	410.520
23 <sup>a</sup>	Macapá	387.539
24 <sup>a</sup>	Rio Branco	319.825
25 <sup>a</sup>	Vitória	297.489
26 <sup>a</sup>	Boa Vista	277.684
27 <sup>a</sup>	Palmas	223.817

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base na referência [117].

Admitindo-se a mesma lógica anterior, a energia economizada poderia ser suficiente para alimentar uma capital com população de cerca de 500.000 habitantes, podendo estar situada entre Aracaju e Cuiabá.

Importante também é repetir, como citado na seção 4.2.4 (penetração de mercado) que, caso o cenário traçado aqui seja atendido, ao longo dos anos, a expectativa mostrada não é de penetração máxima da tecnologia até 2040. A entrada dos dispositivos supercondutores deve estender-se. Não foram incluídas no escopo deste estudo avaliações posteriores a 2040, porém, os dados obtidos aqui permitem inferir que, observado o cenário previsto, haverá espaço para mais aplicações HTS.

## 4.4. Análise de Sensibilidade

Conforme discutido anteriormente, os resultados obtidos são consequência de um conjunto de premissas e parâmetros, e que refletem as impressões do analista e a bibliografia consultada durante a montagem do cenário de referência. Parte das estimativas é mais complexa, e dependente de acontecimentos futuros, de modo que alguns valores apresentam maior incerteza associada. Por exemplo, a estimativa dos custos futuros do material HTS é baseada na série histórica de evolução dos custos da fibra óptica. Tal analogia pode não se concretizar ao longo dos anos. Isso porque, uma ruptura tecnológica nos processos de fabricação poderia reduzir o custo do material, acelerando o processo. Da mesma forma, sob uma ótica pessimista, o preço do material pode demorar um tempo maior para chegar a valores considerados “viáveis” para aplicações comerciais de dispositivos empregando material HTS.

Visando realizar uma estimativa acerca da influência destes parâmetros nos resultados do modelo, a proposta da análise de sensibilidade é variar os mesmos, separadamente, em 20% para mais e para menos, e observar o comportamento do resultado da simulação. É uma forma de estimar a importância de um determinado parâmetro de entrada com relação à resposta de saída.

Para esta análise, será considerado como principal resultado do modelo a energia economizada pela aplicação dos dispositivos supercondutores. Assim, os parâmetros considerados para análise de sensibilidade são:

- Custo do material HTS
- Custo da criogenia
- Consumo futuro de eletricidade no Brasil

Cada um destes parâmetros será variado, e o impacto decorrente desta variação será observado na economia de energia obtida em 2040. Primeiramente, considerando-se a estimativa de custos de evolução dos materiais HTS, apresentada na figura 4.14, a economia de energia obtida foi de 1547 GWh. Alterando-se este custo, utilizando valores 20%, 15% e 10% abaixo, além de 10%, 15% e 20% acima, os resultados de economia de energia obtidos são aqueles apresentados na Tabela 4.25.

**Tabela 4.25.** Análise de sensibilidade com relação ao custo do material HTS.

<b>Variação do custo do material HTS</b>	<b>Energia economizada em 2040 (GWh)</b>
Valor 20% abaixo	5.561
Valor 15% abaixo	4.817
Valor 10% abaixo	3.918
Valor Original	1.547
Valor 10% acima	806
Valor 15% acima	656
Valor 20% acima	568

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A seguir, repetindo-se o método, porém, variando-se as estimativas referentes ao custo da criogenia, para valores 10%, 15% e 20% acima e abaixo da estimativa inicial, os resultados obtidos são aqueles apresentados na Tabela 4.26.

**Tabela 4.26.** Análise de sensibilidade com relação ao custo da criogenia.

<b>Variação do custo da criogenia</b>	<b>Energia economizada em 2040 (GWh)</b>
Valor 20% abaixo	3.485
Valor 15% abaixo	2.890
Valor 10% abaixo	2.382
Valor Original	1.547
Valor 10% acima	1.124
Valor 15% acima	985
Valor 20% acima	884

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Como último parâmetro considerado para a análise de sensibilidade, o consumo futuro de eletricidade no Brasil foi variado. É um parâmetro cuja estimativa foi obtida diretamente com base em dados da EPE (2007). Porém, como o PNE apresenta, é um dado de estimativa difícil, composto por muitas variáveis. Sua influência na economia de energia é apresentada na Tabela 4.27.

**Tabela 4.27.** Análise de sensibilidade com relação ao consumo futuro de eletricidade.

<b>Variação do consumo futuro de eletricidade</b>	<b>Energia economizada em 2040 (GWh)</b>
Valor 20% abaixo	1.237
Valor 15% abaixo	1.314
Valor 10% abaixo	1.392
Valor Original	1.547
Valor 10% acima	1.701
Valor 15% acima	1.779
Valor 20% acima	1.857

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os dados obtidos consolidam a informação apresentada, ao longo da tese, de que a saída do modelo é consequência de um grande conjunto de informações. Os resultados obtidos são uma combinação de entradas, que, por sua vez, são estimadas com base no conhecimento do analista, bem como das referências consultadas. O estudo apresentado permite que outros possam realizar estimativas diferentes, atingir outros resultados, fomentando a discussão sobre a estimativa de cenários futuros para a tecnologia HTS.

Avaliando-se os resultados observados com a variação dos parâmetros de entrada, observou-se quantitativamente o impacto do cenário de entrada nos resultados. Considerando-se os três parâmetros de entrada variados (custo do material HTS, custo da criogenia e o consumo futuro de eletricidade no Brasil), observou-se que o custo do material HTS foi o parâmetro de maior influência na variável de saída (energia economizada em 2040). Uma redução de 20% nos custos do material HTS aumentou em cerca de três vezes e meia a economia futura de energia, o que possibilitou observar que a parametrização, ou seja, o cenário de entrada, apresenta elevada influência na saída do modelo. A seguir, o custo da criogenia apresentou influência menor que o custo do material HTS, porém influência maior que aquela devida ao consumo futuro de energia.

O custo futuro do material HTS está diretamente ligado à evolução tecnológica e à economia de aprendizagem. Além disso, convém ressaltar que o sucesso da tecnologia e uma penetração mais acelerada desta podem levar a uma redução de custo mais rápida

que a prevista. Verificou-se assim que, são incertezas para o modelo de entrada não apenas o custo do material em 2040 mas também a forma da curva que modela a redução dos custos ao longo do tempo.

## 4.5. Conclusões Parciais

Com os resultados positivos advindos da análise qualitativa, realizada no capítulo 3, foi então realizada uma avaliação quantitativa neste capítulo 4, visando estimar os impactos futuros do uso de supercondutores no sistema elétrico, bem como seu possível mercado futuro. Foi considerado um cenário futuro onde os custos dos materiais supercondutores e dos sistemas criogênicos é reduzido gradativamente ao longo do tempo, bem como suas capacidades técnicas (corrente máxima e eficiência de Carnot) são aperfeiçoadas. O modelo adotado para simulação foi aquele apresentado por Sheahen et al., e teve seu escopo limitado em motores, geradores, transformadores e cabos. Embora outras aplicações também sejam consideradas atrativas, como por exemplo, o limitador de corrente supercondutor, este modelo de simulação, devido a seu princípio de operação, só é capaz de capturar vantagens relativas a perdas, o que é uma limitação.

As perdas no sistema elétrico brasileiro foram obtidas no Balanço Energético Nacional, e extrapoladas para o ano de 2015 com uma taxa de 5,1%. O valor obtido foi de 102.755 GWh.

A evolução estimada para os materiais supercondutores foi baseada no comportamento histórico da fibra ótica. Esta analogia foi baseada no fato de que, tanto os custos do material precisam ser reduzidos, como também há necessidade de evolução da tecnologia.

A simulação foi realizada considerando-se o período de 25 anos, compreendido entre 2015 e 2040. Os resultados apresentados, considerando-se o cenário construído, indicam que as aplicações de supercondutividade de alta temperatura começam a entrar no mercado por volta do ano de 2027, porém, sua massificação é lenta, ocorrendo posteriormente a 2040. A energia economizada pode chegar a 3% da energia produzida no Brasil, sendo suficiente para alimentar uma cidade com 500.000 habitantes.

Foram identificados, como principais fatores de influência no avanço da tecnologia, seu custo, sua capacidade técnica e a demanda por criogenia, o que está de acordo com as referências consultadas. Outro fator de influência, não citado em outras fontes, é o custo

da energia. Quanto mais alto é o custo de geração, mais favorável o cenário é ao estabelecimento de tecnologias capazes de promover economia de energia.

# CAPÍTULO 5

---

## Conclusões e Trabalhos Futuros

---

O fenômeno da supercondutividade é considerado por especialistas como uma das grandes descobertas científicas do século 20. Suas propriedades e características o habilitam a apresentar relevância para diferentes áreas do conhecimento, desde a área da saúde e diagnósticos, passando pela área dos transportes e pelo setor elétrico. Este trabalho esteve focado na supercondutividade de alta temperatura, pois considerou-se que a supercondutividade de baixa temperatura possivelmente já tenha atingido seu mercado, que está limitado a áreas onde as propriedades da supercondutividade não encontram concorrência. A demanda por criogenia com Hélio e seu elevado custo dificultam a sua competitividade em áreas onde existem possíveis tecnologias substitutivas.

Com relação à supercondutividade de alta temperatura, espera-se que esta possa romper a barreira imposta pela elevada demanda de criogenia, já que há possibilidade de uso do Nitrogênio, e, desta forma, apresentar-se como competitiva em diferentes áreas. O estudo aqui apresentado focou em avaliar aplicações no sistema elétrico, porém, na

realização do trabalho, especialmente durante a elaboração do capítulo 2, que tratou de um acompanhamento tecnológico, observou-se que a característica de resistência quase nula, a capacidade de lidar com elevados campos magnéticos e o diamagnetismo são propriedades que apresentam aplicações variadas, como, por exemplo, sistemas de diagnóstico para medicina, trens de levitação tipo Maglev, fornos de indução, entre outras. Com relação ao sistema elétrico, o estudo revelou que, caso esta tecnologia venha a tornar-se comercial, é esperada uma revolução na forma como são tratados dispositivos tradicionais como motores, geradores, transformadores e cabos. A avaliação técnica e os protótipos já desenvolvidos mostram que os equipamentos da “geração HTS” apresentarão não somente vantagens técnicas com relação aos anteriores, como ainda novas funcionalidades. Um exemplo típico de nova funcionalidade é o transformador, que poderá ser produzido juntamente com um limitador de corrente supercondutor. Já com respeito a novos equipamentos, podem ser destacados o limitador de corrente supercondutor e os dispositivos de armazenamento de energia tipo SMES.

Com a realização da avaliação tecnológica realizada no capítulo 2, e a confirmação de que as vantagens técnicas são grandes, o estudo seguiu com uma avaliação qualitativa, no capítulo 3, visando conhecer a situação atual da tecnologia no mercado e no mundo, bem como estimar sua potencial utilização. Foram realizadas três análises, iniciando-se pelo uso do método dos sete domínios, proposto por Mullins [8]. Este método, desenvolvido originalmente para avaliar determinadas oportunidades de negócio, não foi encontrado na literatura sendo empregado para avaliações tecnológicas, sendo esta realizada aqui. Por tratar-se de uma tecnologia nova, avaliada como potencialmente portadora não de uma, mas de várias oportunidades de negócio, o método foi alterado, sendo reduzido de sete para três domínios, sendo chamado então de método mercado-indústria-equipe, com foco nos aspectos macro. Esta avaliação mostrou, como principais resultados:

- Existem potenciais mercados para utilização desta tecnologia, visto que a mesma pode ser empregada para solucionar problemas não cobertos pela tecnologia de hoje, e ainda, trazer aperfeiçoamentos técnicos para dispositivos existentes.
- Já estão presentes, na indústria, agentes interessados em fabricar a tecnologia, e ainda empresas capazes de tirar proveito da mesma e lançar dispositivos baseados em material HTS.

- O aspecto equipe informou que existe mão de obra, sob forma de pessoal qualificado, e que a pesquisa e desenvolvimento na área, bem como a realização de eventos técnicos, tem sido regular.

Na sequência do estudo, uma avaliação qualitativa baseada em análise SWOT foi empregada, visando sumarizar Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças associadas à tecnologia HTS. A análise permitiu inferir que os materiais deste tipo apresentam grandes forças e oportunidades, especialmente na consideração das possibilidades de melhorias técnicas e surgimento de novas aplicações, o que é coerente com o resultado observado na análise Mercado-Indústria-Equipe. Entretanto, fraquezas e ameaças também estão presentes, associadas à necessidade de criogenia, aos ainda elevados custos de fabricação e a uma maior necessidade de desenvolvimento da tecnologia, que ainda não está totalmente madura. Por exemplo, a implantação de protótipos em sistemas elétricos é bastante positiva, porém, o quanto confiável eles serão ao longo dos anos? Assim, em concordância com a literatura, mostram-se como principais desafios para o uso da tecnologia:

- Custo do material HTS, se comparado a alternativas tradicionais;
- Evolução técnica associada aos materiais, que precisarão compensar seu custo mais elevado com vantagens técnicas elevadas;
- Custo de criogenia, que é uma penalidade ao rendimento global do sistema;
- Evolução técnica da criogenia;
- Confiabilidade dos dispositivos e aceitação por parte do segmento de energia elétrica, tipicamente conservador.

Uma breve avaliação regional, conduzida também no capítulo 2, mostrou que ao redor do mundo, há uma política de busca pela inovação. A realização de investimentos no passado tem trazido frutos até os dias de hoje, o que confirma as recomendações apresentadas por [15]. A ciência dos materiais, historicamente, envolve riscos, é de dinâmica lenta, porém, estudos de caso como dos semicondutores e da fibra ótica mostram que novos materiais apresentam geralmente resultados muito positivos para a sociedade. Durante o período de maturação da tecnologia, é necessário envolvimento do estado, através de financiamento de projetos em empresas públicas e privadas, além de universidades, considerando-se sempre uma tolerância um pouco maior ao risco. Deve-

se considerar também o desenvolvimento, em paralelo, da principal tecnologia de suporte, neste caso, a criogenia.

Após a avaliação qualitativa realizada no capítulo 3, e de resultados considerados favoráveis à aplicação da tecnologia, ainda que esta apresente algumas fraquezas e ameaças, o capítulo 4 apresentou uma avaliação quantitativa baseada na metodologia desenvolvida por [14]. O modelo de simulação, desenvolvido em planilha eletrônica (Microsoft Excel), realiza um comparativo entre tecnologia convencional e tecnologia HTS. Para tal, foi construído um cenário futuro acerca dos materiais HTS.

Por tratar-se de uma tecnologia nova, a análise foi conduzida sob condições positivas ao uso da tecnologia, ou seja, considerando melhorias técnicas contínuas ao longo do tempo (melhorias na capacidade de condução da corrente) e economias de escala (redução de custos). Em outras palavras, a tecnologia foi considerada como viável do ponto de vista técnico e econômico ao longo dos anos. Foi considerado também o progresso técnico da criogenia associada.

A análise apresentou como principal resultado um potencial de economia de energia da ordem de 3% do consumo de energia no Brasil ao longo do período de análise de 25 anos (2015 até 2040). Esta energia seria suficiente para alimentar, hoje, uma cidade com cerca de 500.000 habitantes.

Considerou-se que o uso efetivo da mesma no Brasil pode apresentar uma defasagem de 10 anos se comparada com o mercado Norte-Americano.

Deve ser observado que, a análise consistiu em comparar o custo operacional durante todo o ciclo de vida de determinados equipamentos, contidos no escopo da análise, especificamente motores, geradores, transformadores e cabos. A seleção do escopo deu-se através de pesquisas conduzidas pela empresa Bento Strategy e estimativas realizadas pelos especialistas do grupo CONECTUS, e por conta da natureza do modelo, contemplou apenas o aspecto técnico da mitigação das perdas, podendo então ser considerada como uma análise conservadora do ponto de vista de potencial de aplicação, já que dispositivos HTS apresentam outras vantagens técnicas, não capturadas por esta análise.

Assim como na análise quantitativa conduzida para o estudo de caso Norte-Americano, ficou comprovado que os fatores custo do material HTS e custo da criogenia são decisivos para o futuro da tecnologia. Porém, devido ao alto custo da energia no Brasil, a análise mostrou que o custo da energia também é um fator decisivo:

quanto mais elevado ele é, mais sentido faz utilizar tecnologias relacionadas à eficiência energética.

Como a análise contempla uma comparação durante um período de tempo longo, recomenda-se que os resultados financeiros apresentados não sejam tomados como principal resultado, mas sim, os resultados do ponto de vista de eficiência energética. Estes estão sujeitos a menos fontes de incerteza, não sofrendo influência, por exemplo, de taxas de desconto, valores futuros ou mesmo especulações sobre custos futuros de energia.

Sugere-se que este modelo possa ser re-executado e avaliado periodicamente, visando principalmente ajustar os resultados ao longo do tempo. Sua re-execução pode seguir três critérios: primeiramente, a adoção de uma periodicidade constante ao longo dos anos. Outra opção seria realizar este modelo dentro de uma periodicidade constante, e avaliar os resultados passados, observando as variações nas suas saídas, visando ajustar a periodicidade, evitando execuções excessivas, que não acrescentam resultados consideráveis, ou ainda poucas execuções, que poderiam acarretar em perda de informações. A terceira opção seria associar execuções do modelo a novas descobertas técnicas, consideradas capazes de acelerar o processo de entrada no mercado da tecnologia.

Uma vertente futura seria estender este modelo, para viabilizar uma análise capaz de capturar outros aspectos técnicos da supercondutividade de alta temperatura. Uma possibilidade para tal é a conversão dos benefícios técnicos em redução de custos, o que possibilitaria sua inclusão neste modelo, por exemplo, dos limitadores de corrente supercondutor, dispositivos que apresentam vantagens técnicas que não somente perdas reduzidas, e que foram apontados como promissores por todas as avaliações consultadas.

Ainda com respeito a possíveis trabalhos futuros, este modelo poderia ser considerado como ferramenta para avaliação de possíveis mecanismos governamentais de incentivo a pesquisa na área de supercondutividade. Tanto o modelo pode ser utilizado para avaliar o potencial de emissões de gases de efeito estufa evitadas, como também avaliar o impacto de medidas e incentivos que supostamente possam acelerar o processo de maturação da tecnologia.

Outros dois recursos disponíveis no modelo de simulação, não explorados neste estudo, podem ser trabalhados para outras duas análises futuras. Primeiramente, admitindo que a energia economizada torna-se disponível para consumo, o uso de

supercondutores pode postergar a necessidade de instalação de novos empreendimentos de geração, e por consequência, reduzir possíveis emissões de gases de efeito estufa advindas deste novo empreendimento. O uso de materiais supercondutores apresenta um aspecto de eficiência energética, e este aspecto pode levar a impactos ambientais positivos, que poderiam ser avaliados.

A seguir, o modelo oferece a possibilidade de realizar a comparação entre dois materiais supercondutores distintos. Este recurso foi implementado visando realizar uma comparação entre o BSCCO e o YBCO, materiais considerados mais promissores na ocasião. Atualmente, um novo material, o  $MgB_2$ , vem sendo considerado promissor para algumas aplicações [122], e este recurso do modelo de simulação poderia ser adaptado para realizar uma comparação, admitindo-se um cenário onde o  $MgB_2$  pudesse vir a tornar-se uma opção comercial.

# CAPÍTULO 6

---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] Rose-Innes, A. C.; Rhoderick E. H.; **Introduction to Superconductivity**, Second Edition, Pergamon Press, 1978.
- [2] Tinkham, M.; **Introduction to Superconductivity**, Second Edition, McGraw-Hill Inc., 1996.
- [3] Sheahen, P. T.; **Introduction to High-Temperature Superconductivity**, First Edition, Kluwer Academics Publisher, 2002.
- [4] <<http://superconductors.org>>, **Superconductor Information for the Beginner**. Acesso em: 02/08/2009.
- [5] <<http://www.amsc.com>>, **Site da American Superconductor**. Acesso em: 07/08/2009.
- [6] <<http://www.zenergy.com/>>, **Site da Zenergy Power**. Acesso em: 07/08/2009
- [7] <<http://superconductorweek.com/cms/>>, **Site da Superconductor Week**. Acesso em: 07/05/2009

- [8] Mullins, J. W.; **The New Business Road Test: What entrepreneurs and executives should do before writing a business plan**. First Edition, Prentice-Hall, 2004.
- [9] Soares, I., Pinho C., Couto J., Moreira, J.; **Decisões de Investimento - Análise financeira de projectos**. Primeira Edição, Lisboa, Edições Silabo, 2008.
- [10] Chapman, A.; **SWOT Analysis**. 1995, Disponível em: <<http://www.businessballs.com/swotanalysisfreetemplate.htm>>, Acesso em: 10/10/2012
- [11] Schaeffer, R.; Szklo, A. S.; **Future electric power technology choices of Brazil: a possible conflict between local pollution and global climate change**, Elsevier Energy Policy, V. 29, n. 5, pp. 355-369, April 2001.
- [12] Schaeffer, R.; Logan, J.; Szklo, A. S.; Chandler, W.; Marques, J. C. S.; **Developing Countries & Global Climate Change - Electric Power Options in Brazil**. Technical Report, Pew Center on Global Climate Change, May 2000.
- [13] Jannuzzi, G. M.; Swisher, J. N. P.; **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos**. Primeira Edição, Campinas, Editora Autores Associados, 1997
- [14] Sheahan, T. P.; Mcconnell, B. W.; Mulholland, J. W.; **Method for Estimating Future Markets for High-Temperature Superconducting Power Devices**, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, nº 2, Junho de 2002.
- [15] CCAS, Coalition for the Commercial Application of Superconductors, **Superconductivity: Present and Future Applications**, IEEE Council on Superconductivity, Brochure, 2009
- [16] <[http://www.condumax.com.br/html/tabelas/tabela\\_02.htm](http://www.condumax.com.br/html/tabelas/tabela_02.htm)>, **Tabelas de condutores**. Acesso em: 04/05/2010
- [17] <<http://www.amsc.com/products/htswire/1gHSP.html>>, **Informações sobre fios supercondutores**. Acesso em: 04/05/2010
- [18] <<http://www.amsc.com/products/htswire/faq.html>>, **Perguntas Frequentes a respeito de fios supercondutores**. Acesso em: 04/05/2009
- [19] Kalsi, S. S.; **Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment**, First Edition, New Jersey, Wiley & Sons, 2011.
- [20] Stephan, R. M.; Andrade Jr., R.; Polasek, A.; **Prospective Applications of High Temperature Superconductors in the Electric Power Energy Sector**, EletroEvolução (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, v. 40, n. setembro, p. 67-74, 2005.

- [21] Lindsay, D.T., **High temperature superconducting cables for power transmission and distribution**. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, vol.3, no., pp. 1096-1097 vol.3, 7-12 Sept. 2003.
- [22] <<http://www.tresamigasllc.com>>, **Projeto Três Amigas LLC** Acesso em: 04/10/2012
- [23] <<http://www.tresamigasllc.com>>, **Projeto Três Amigas LLC** Acesso em: 04/10/2012
- [24] Tres Amigas LLC, **Uniting The Nation's Electric Power Grid**, Pure Energy Conference & Expo, Clovis Civic Center, 18/07/2012, disponível em <<http://www.tresamigasllc.com>>, acesso em 04/11/2012
- [25] McConnell, B.W.; Mehta, S.P.; Walker, M.S., **HTS transformers**, Power Engineering Review, IEEE , vol.20, no.6, pp.7-11, Jun 2000.
- [26] Donnier-Valentin, G.; Tixador, P.; Vinot, E., **Considerations about HTS superconducting transformers**, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on , vol.11, no.1, pp.1498-1501, Mar 2001.
- [27] Riemersma, H.; Eckels, P.W.; Barton, M.L.; Murphy, J.H.; Litz, D.C.; Roach, J.F., **Application of Superconducting Technology to Power Transformers**, power apparatus and systems, iee transactions on , vol.PAS-100, no.7, pp.3398-3407, July 1981.
- [28] H. Zueger, **630 kVA high temperature superconducting transformer**, Cryogenics, vol. 38, no. 11, pp. 1169–1172, 1998.
- [29] Hayakawa, N.; Kagawa, H.; Okubo, H.; **A System Study on Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) with the Functions of Fault Current Suppression and System Stability Improvement**, IEEE Transactions on Applied Superconductivity. v.11, n.1, 2001, p.1936-1939.
- [30] Kalsi, S.S.; Weeber, K.; Takesue, H.; Lewis, C.; Neumueller, H.-W.; Blaugher, R.D., **Development status of rotating machines employing superconducting field windings**, Proceedings of the IEEE , vol.92, no.10, pp. 1688-1704, Oct. 2004.
- [31] Voccio, J.; King, C.; Aized, D.; Thieme, C.; MacDonald, T.; Snitchler, G.; Gamble, B.; Malozemoff, A.P., **2G HTS Wires and the Implications for Motor and Generator Applications**, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on , vol.17, no.2, pp.1591-1594, June 2007.

- [32] AMSC, **Optimal Electric Ship Propulsion Solution**, disponível em <[http://www.amsc.com/products/library/Maritime\\_Reporter\\_final3\\_sk1\\_73002\\_final.pdf](http://www.amsc.com/products/library/Maritime_Reporter_final3_sk1_73002_final.pdf)>, relatório, Acesso em 04/03/2009.
- [33] Han, Y.H.; Hull, J.R.; Han, S.C.; Jeong, N.H.; Sung, T.H.; Kwangsoo No, **Design and characteristics of a superconductor bearing**, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on , vol.15, no.2, pp. 2249-2252, June 2005.
- [34] Hull, J.; **Superconducting bearings**, Superconductivity Sci. Technol., vol. 13, pp. R1–R14, 2000.
- [35] Burton, T.; Sharpe, D.; Jenkins, N.; Bossanyi, E.; **Wind Energy Handbook**. West Sussex, John Wiley & Sons, 2001
- [36] Patel, M. R.; **Wind and Solar Power Systems**. United States of America, CRC Press, 1999
- [37] Aguiar Junior, E. A.; 2007, **Análise Básica de Operação do Gerador de Dupla Alimentação para Aproveitamento Eólico**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [38] Lewis, C.; Müller, J.; **A Direct Drive Wind Turbine HTS Generator**, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, pp.1-8, June 2007.
- [39] Molly, J. P.; **Requirements for Next Generation Wind Turbines**, DEWI GmbH, 2002, disponível em <[www.wissenschaft.de](http://www.wissenschaft.de)>, acesso em 12/06/2007.
- [40] Komarek, P.; Noe, M., **Superconducting devices for optimization of renewable electric power systems**. Forschungszentrum Karlsruhe, Institute for Technical Physics, 2007.
- [41] American Superconductor, **Power Delivery Solutions For The Smart Grid**, <<http://www.amsc.com/products/transmissiongrid/flexible-AC-transmission-systems.html>>, Acesso em 12/10/2007.
- [42] Zenergy Power, **HTS Induction Heater Datasheet**, <<http://www.zenergypower.com/images/Datenblaetter/ih-datasheet-en.pdf>>, acesso em 04/07/2008.
- [43] <<http://www.bueltmann.com>>, **Bültmann Special Machines**. Acesso em: 04/07/2008.
- [44] <<http://www.rtri.or.jp>>, **Railway Technical Research Institute**. Japão, Acesso em: 04/07/2008.

- [45] Cheung K.Y.C, Cheung S.T.H, Navin De Silvia R.G, Juvonen M.P.T, Singh R, Woo J.J.; **Large-Scale Energy Storage Systems**. Imperial College London: ISE2, 2002/2003.
- [46] Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, **Fault Current Limiters**. Disponível em < <http://www.ornl.gov> >, Acesso em 04/07/2012.
- [47] Ribeiro, P. F.; Crow, M. L.; **Energy Storage Systems for Advanced Power Applications**, Proceedings of the IEEE, vol.89, pp1744-1756, 2001.
- [48] Wen, J.; Jin, J. X.; Guo, Y. G.; Zhu, J. G.; **Theory and Application of Superconducting Magnetic Energy Storage**. SMES Coil Technology, disponível em <<http://itee.uq.edu.au/~aupec/aupec06/htdocs/content/pdf/51.pdf>> Acesso em 10/10/2012.
- [49] Adler, A.D.; Posner, E.A.; **Cost-Benefit Analysis: Economic, Philosophical, and Legal Perspectives**, University of Chicago Press Journals; 1 edition 01/01/2001
- [50] IEEE, **IEEE explore**, Base de artigos publicados pelo IEEE, Disponível em <<http://ieeexplore.ieee.org>>, Acesso em 04/07/2007.
- [51] Elsevier, **Elsevier Data**, Base de artigos publicados pelo Elsevier, Disponível em <<http://www.elsevier.com>>, Acesso em 04/07/2007.
- [52] CONECTUS, **Consórcio das Empresas Européias Determinadas a Empregar Supercondutividade**. Disponível em <<http://www.conectus.org>>, Acesso em 04/09/2012
- [53] The IEEE Council on SuperConductivity, CSC, **European Superconductivity News Forum**, Disponível em <<http://www.ewh.ieee.org/tc/csc/europe/newsforum/announcements.html>>, acesso em 04/11/2012.
- [54] Project Management Institute, PMI, **A Guide to Project Management Body of Knowledge - PMBOK Guide**, 2004 Edition.
- [55] U.S. Congress, Office of Technology Assessment, **High-Temperature Superconductivity in Perspective**, OTA-E-440, Washington, DC: U.S. Government Printing Office, April 1990.
- [56] Numüller, H. W.; Nick, W.; Wacker, B.; Frank, M.; Nerowski, G.; Frauenhofer, J.; Rzadki, W.; Hartig, R.; **Advances in and Prospects for Development of High-Temperature Superconductor Rotating Machines at Siemens**, Institute of Physics Publishing, Superconductor Science and Technology.

- [57] Larbalestier, D.; Blaugher R. D.; Schwall R. E.; Sokolowski R. S.; Suenaga M.; Willis J. O.; **Power applications of superconductivity in Japan and Germany**, International Technology Research Institute, Panel Report, September 1997.
- [58] <<http://www.dee.ufrj.br/lasup/>>, **Página do laboratório de supercondutividade e aplicações**. Acesso em: 24/03/2007.
- [59] Ferreira, O. C.; **O Sistema Elétrico Brasileiro**. Artigo, Disponível em <<http://ecen.com/eee32/sistelet.htm>>, Acesso em: 14/06/2009.
- [60] Kirtley, J. L. Jr.; **Applications of superconductors in electric utility systems**. Power Engineering Society Summer Meeting, 1999. IEEE .
- [61] Aguiar Junior, E. A.; Stephan, R. M.; Schaeffer, R.; **Análise da Viabilidade de Aplicação da Tecnologia da Supercondutividade de Alta Temperatura em Sistemas Elétricos**. In: XIII Congresso Brasileiro de Energia, 2010, Rio de Janeiro. CBE - XIII Congresso Brasileiro de Energia, 2010.
- [62] EPRI, **Pursuing the promise of superconductivity**, EPRI J., vol. 12, no. 6, pp. 4–15, 1987.
- [63] Wolsky, A. M.; Geise, R. F.; Daniels E. J.; **The new superconductors: Prospects for applications**, Scientific American, vol. 260, no. 2, pp. 60–69, Feb. 1989.
- [64] Bento Strategy, **Superconductor Market Research HTS in 2008**. Divulgação Eletrônica, Comunicação Pessoal
- [65] Bento Strategy, **Superconductor Market Research HTS in 2009**, Divulgação Eletrônica, Comunicação Pessoal.
- [66] Bento Strategy, **Superconductor Market Research HTS in 2010**, Divulgação Eletrônica, Comunicação Pessoal.
- [67] EPE, **Plano Nacional de Energia 2030**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento.aspx>>, acesso em 12/10/2012.
- [68] EPE, **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020**. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em <[http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302_1.pdf)>, acesso em 12/10/2012.
- [69] EIA, Energy International Agency, **Annual energy outlook 1999**, Washington, D.C., DOE/EIA-0383(99), Dec. 1998.

- [70] Mulholland, J. W.; **Model of the losses in the U. S. electrical system.** in DistGen 2000 Conference, San Antonio, TX, 20/03/2000.
- [71] Cipoli, J. A.; Borges, J. A. M.; **Avaliação das Perdas de Energia no Sistema Elétrico**, I-SIDEE, Belo Horizonte, 1990.
- [72] Poveda, M.; **A New Method to Calculate Power Distribution Losses in an Environment of High Unregistered Loads**, IEEE Transmission and Distribution Conference, 1999.
- [73] Flaten, D. L.; **Distribution System Losses Calculated by Percent Loading**, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, N° 3, 1988.
- [74] Méffe, A.; **Metodologia para Cálculo de Perdas Técnicas por Segmento do Sistema de Distribuição**, Dissertação de Mestrado, São Paulo, 2001.
- [75] EPE, **Balanco Energético Nacional 2010**. Ano Base 2009. Brasília, 2010. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>, balanço energético nacional.
- [76] ONS, **Página internet do Operador Nacional do Sistema Elétrico**, ONS, <<http://www.ons.com.br>>, acesso em 12/08/2011.
- [77] ANEEL, **Página internet da Agência Nacional de Energia Elétrica**, Aneel, disponível em <<http://www.aneel.gov.br>>, acesso em 12/04/2011.
- [78] Duke Energy, **Dicionário**, disponível em <[http://www.duke-energy.com.br/negocios/dicionario.asp?G\\_ID=331&Letra=F&id](http://www.duke-energy.com.br/negocios/dicionario.asp?G_ID=331&Letra=F&id)>, acesso em 27/03/12.
- [79] Perfectum, **Tarifa Horo-Sazonal**. disponível em <[http://www.perfectum.eng.br/energia/tarifa\\_horo.html](http://www.perfectum.eng.br/energia/tarifa_horo.html)>, acesso em 27/03/2012.
- [80] ANEEL, **BIG - Banco de informações de geração**, ANEEL, disponível em <<http://www.aneel.gov.br/15.htm>>, acesso em 22/07/2011.
- [81] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, **ABNT NBR 5356, Transformadores de Potência**, Norma Técnica, Rio de Janeiro, 1981.
- [82] Martignoni, A.; **Transformadores**, 6<sup>a</sup> edição, Rio de Janeiro. Editora Globo, 1983. 307p.
- [83] Inmetro, Portaria Inmetro n° 285, de 11 de agosto de 2008 – Regulamento Técnico Metrológico, **Medidores de Energia Elétrica Ativa**, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.
- [84] U. S. Department of Energy; **Coated Conductor Technology Development Roadmap**. Agosto de 2001, disponível em

- <<http://www.ornl.gov/sci/htsc/documents/pdf/CCRoadmap8-23.PDF>>, acesso em 20/11/2011.
- [85] American Superconductor, **World's First Transmission Voltage Superconductor Cable Energizes in Lipa's Power Grid**, disponível em <<http://www.amsc.com/>>, acesso em 21/07/2008.
- [86] Masur, L.: **Doubling The efficiency with superconductivity**, Industrial Heating Journal, 05/09/2008, disponível em <[http://www.industrialheating.com/Articles/Feature\\_Article/BNP\\_GUID\\_9-5-2006\\_A\\_10000000000000416320](http://www.industrialheating.com/Articles/Feature_Article/BNP_GUID_9-5-2006_A_10000000000000416320)>, acesso em 08/01/2012.
- [87] Andrade JR., R.; **Cotação da American Superconductor 1209-05**, correio eletrônico do Professor Rubens de Andrade Júnior – Comunicação Pessoal recebida em 13/04/2010.
- [88] Peterson, D.; **Highlights of 2007 DOE Annual HTS Peer Review**, Superconductivity for electric systems annual peer review, Arlington - Virginia, 07/08/2007.
- [89] Hott, R; **Applications of High-Temperature Superconductors Status Report 2003**, Disponível em <<http://wwwwifp.fzk.de/ISAS/statusreport/sr03/index.html>>, versão 12/02/2003, acesso em 11/03/2012.
- [90] Coldedge Technologies; **Closed Cycle Cryocooler Performance Matrix**. Disponível em <[http://www.coldedgetech.com/index.php?mod=page&id\\_pag=14](http://www.coldedgetech.com/index.php?mod=page&id_pag=14)>, acesso em 25/03/12..
- [91] Svensrud, E.; Mathisen, J.; Susort, S.; **Pulse Tube Cryocooler**, CERN, Geneva, 07/02/2008, disponível em <<http://indico.cern.ch/getFile.py/access?subContId=0&contribId=7&resId=0&materialId=0&confId=44317>>, acessado em 25/03/2012.
- [92] Garcia, A. G. P.; **Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria**, 2003. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- [93] Schiferl, R.; Flory, A.; Livoti, W. C.; Umans, S. D.; **High Temperature Superconducting Synchronous Motors: Economic Issues for Industrial Applications**, In: IEEE Transactions on Industrial Applications, Volume 44, Issue 5, September 2008, pp. 1376-1384.

- [94] Zheng, L. H.; Jin, J. X.; Gui, Y. G.; Zhu, J. G.; **Technical and Theoretical Analysis of HTS Machines and Their Development**, Nature Sciences, 2006, disponível em <<http://naturesciences.org>>, acessado em 08/03/2011.
- [95] Kwon, Y. K.; Sohn, M. H.; Baik, S. K.; Lee, E. Y.; Kim, J. M.; Moon, T. S.; Park, H. J.; Kim, Y. C.; Ryu, K. S.; **Development of a 100 hp Synchronous Motor with HTS Field Coils**, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume 15, Issue 2, Part 2, June 2005 pp. 2194 – 2197.
- [96] Leonelli, P. A.; **Informações preliminares sobre vendas de motores elétricos**, comunicação pessoal, recebida por correio eletrônico em 23/12/2011.
- [97] Ministério das Minas e Energia. Secretaria de Energia. Departamento Nacional de Desenvolvimento Energético. **Eficiência Energética**. Brasília, 12/2001. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/desenvenergetico/Documentos>>. Acesso em: 25/04/2011.
- [98] Sheahen, T. P.; Mcconnel, B. W.; **Implementation Plan for Cryogenic R&D is support of the HTS program**, 27/08/2001, disponível em <[http://www.ornl.gov/sci/htsc/documents/pdf/Cryo\\_Implement\\_Plan\\_5-17-01.pdf](http://www.ornl.gov/sci/htsc/documents/pdf/Cryo_Implement_Plan_5-17-01.pdf)>, acesso em 20/02/2012.
- [99] Gouge, M. J.; Demko, J. A.; Mcconnel, B. W.; **Cryogenics Assessment Report**, Maio 2002, disponível em <<http://www.ornl.gov/sci/htsc/documents/pdf/CryoAssessRpt.pdf>>, acesso em 21/02/2012.
- [100] ABRACE, Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres.; **Agenda de Política Energética 2011-2014 – Uma contribuição ao País**, Julho de 2010, disponível em <<http://www.abrace.org.br/download/agenda%20politica%20energetica%20abrace%20final.pdf>>, acesso em 12/03/12.
- [101] FIRJAN; **Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil?**, N° 8 – Agosto de 2011, disponível em <<http://www.firjan.org.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908CEC30E85C950131DD00CEF912FA>> acesso em 12/03/12.
- [102] Clemente, L.; **Cotação 20253568**, Tecnobre Comércio e Representações LTDA, Comunicação pessoal recebida através de correio eletrônico em 24/03/2012.
- [103] Xenergy INC., **United States Industrial Electric Motor Systems Market Opportunities Assessment**, Burlington, MA, Relatório, Dezembro de 1998.

- [104] Itaipu Binacional, **Página Internet da Empresa**, disponível em <<http://www.itaipu.gov.br/>>, acesso em 12/03/12.
- [105] CPFL, **Custos de Itaipu**, disponível em <<http://www.aleph.com.br/sciarts/cpfl/CPFL%20-%20Custocurso.htm>>, acesso em 20/03/2012.
- [106] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, **Aplicativo Sindat**, disponível em <<http://aplicsindat.ons.org.br/sindat/>> acesso em 16/03/2012.
- [107] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, **Manual de operação do aplicativo Sindat**, disponível em <<http://aplicsindat.ons.org.br/sindat/%5Crelatorios%5CManual%20de%20utilizac%20-%20rev0.pdf>>, acesso em 16/03/2012.
- [108] ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico, **Plano de ampliações e reforços 2012-2014**, disponível em <[http://www.ons.com.br/plano\\_ampliacao/plano\\_ampliacao.aspx](http://www.ons.com.br/plano_ampliacao/plano_ampliacao.aspx)>, acessado em 12/02/2012
- [109] Lopes, V. O.; Supervisor Técnico, P & L Engenharia Elétrica, LTDA. **Cotação de transformador**, comunicação pessoal recebida por correio eletrônico em 05/04/2012
- [110] Haffner, S.; **A linha de transmissão**, Apostila disponível em <[http://slhaffner.phpnet.us/sistemas\\_de\\_energia\\_1/seI3.pdf](http://slhaffner.phpnet.us/sistemas_de_energia_1/seI3.pdf)>, versão 10/09/2007, acessado em 10/03/2012.
- [111] NEXANS, **catálogo online de cabos**, disponível em <[http://www.nexans.com.br/eservice/SouthAmerica-pt\\_BR/navigate\\_213629/Cabos\\_de\\_Alum\\_nio\\_Nu\\_com\\_Alma\\_de\\_A\\_o\\_CAA\\_Serie\\_AWG\\_.html#top](http://www.nexans.com.br/eservice/SouthAmerica-pt_BR/navigate_213629/Cabos_de_Alum_nio_Nu_com_Alma_de_A_o_CAA_Serie_AWG_.html#top)>, acesso em 05/03/2012.
- [112] DOE, Department of Energy, **Understanding and Engineering the Performance of 2G HTS Wire**. DOE Annual Peer Review, Wire Development Group, Arlington VA, 07/08/2007
- [113] Microsoft Excel 2003, **Ajuda do comando VPL**, Disponível na ajuda do programa, acessível através da tecla “F1”.
- [114] Nau, S. L.; Verardi, M.; Silveira, S. B.; Sens, M. A.; **Motores elétricos com enrolamentos supercondutores de alta temperatura**, disponível em <[http://www.essel.com.br/cursos/material/02/motores/Motor\\_Super\\_Condutor-Motor\\_Eletrico.pdf](http://www.essel.com.br/cursos/material/02/motores/Motor_Super_Condutor-Motor_Eletrico.pdf)>, acesso em 07/04/2012.

- [115] Secretaria de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços; **Balanco energético do Estado do Rio de Janeiro 2009**, Disponível em <[http://www.forumdeenergia.com.br/nukleo/pub/balanco\\_2009\\_rj.pdf](http://www.forumdeenergia.com.br/nukleo/pub/balanco_2009_rj.pdf)>, acesso em 08/04/2012.
- [116] Instituto Pereira Passos, **Armazém de dados – Portal Geo**, disponível em <<http://portalgeo.rio.rj.gov.br/portalgeo/index.asp>>, acesso em 08/04/2012.
- [117] IBGE, **Censo Demográfico 2010**, disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>>, acessado em 08/04/2012.
- [118] IPCC, 2011: **IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1075 pp.
- [119] Aneel, **Tarifas de energia elétrica de abril de 2011**, disponível em <[http://rad.aneel.gov.br/ReportServerSAD?%2fSAD\\_REPORTS%2fConsumidoresConsumoReceitaTarifaMedia-ClasseConsumo&rs:Command=Render](http://rad.aneel.gov.br/ReportServerSAD?%2fSAD_REPORTS%2fConsumidoresConsumoReceitaTarifaMedia-ClasseConsumo&rs:Command=Render)>, acesso em 12/04/2011.
- [120] Microsoft Powerpoint 2003, **Clipart**, Disponível no programa, acessível através da opção de menu “inserir/imagem/clipart...”.
- [121] Hillebrand, J., **The Magnetic Levitation Trais: A Technology ahead of its Time?**, International Master of Management Science, 2008, Grin Verlagsprogramm.
- [122] Phys.org, **Optimizing a Novel Superconducting Material**, 2012, Disponível em <<http://phys.org/news/2012-07-optimizing-superconducting-material.html>>, acesso em 25/11/2012.

# ANEXO A – PRINCIPAIS FÓRMULAS E EQUAÇÕES DO MODELO

## 1) Cálculo do Valor Presente Líquido:

De acordo com [113], a função VPL calcula o valor líquido atual de um investimento utilizando a taxa de desconto e uma série de futuros pagamentos (valores negativos) e receita (valores positivos). Sua sintaxe é dada por

$$\text{VPL}(\text{taxa}, \text{valor1}, \text{valor2}; \dots) \quad (\text{A.1}),$$

onde “Taxa” é a taxa de desconto sobre o intervalo de um período, “valor1” e “valor2”... são argumentos de 1 a 29 que representam os pagamentos e a receita. Deve ser observado que:

- Valor1; valor2; ... devem ter o mesmo intervalo de tempo entre eles e ocorrer ao final de cada período.
- VPL utiliza a ordem de valor1; valor2; ... para interpretar a ordem de fluxos de caixa. Certifique-se de fornecer os valores de pagamentos e receita na seqüência correta.
- Argumentos que são números, células vazias, valores lógicas ou representações em forma de texto de números são contados; os argumentos que são valores de erro ou texto que não podem ser traduzidos em números são ignorados.
- Se um argumento for uma matriz ou referência, apenas os números da matriz ou referência serão contados. Células vazias, valores lógicos, valores de texto ou de erro na matriz ou referência são ignorados.

Alguns comentários adicionais:

- O investimento de VPL começa um período antes da data do fluxo de caixa de valor1 e termina com o último fluxo de caixa na lista. O cálculo de VPL baseia-se em fluxos e caixa futuros. Se o seu primeiro fluxo de caixa ocorrer no início do primeiro período, o primeiro valor deverá ser incluído ao resultado VPL, e não nos valores de argumentos. Para obter mais informações, consulte os exemplos abaixo.
- Se  $n$  for o número de fluxos de caixa na lista de valores, a fórmula para VPL será

$$\text{VPL} = \sum_{j=1}^n \frac{\text{valores}_j}{(1 + \text{taxa})^j} \quad (\text{A.2}).$$

- VPL assemelha-se à função VP (valor presente). A principal diferença entre VP e VPL é que a primeira permite que os fluxos de caixa comecem no final ou no início do período. Diferentemente dos valores de fluxo de caixa da variável VPL, os fluxos de caixa VP devem ser constantes durante o período de investimento. Para obter informações sobre anuidades e funções financeiras, consulte VP.
- VPL também está relacionado à função TIR (taxa interna de retorno). TIR é a taxa para qual VPL é igual a zero:  $\text{VPL}(\text{TIR}(\dots); \dots) = 0$ .

## 2) Expressão para obtenção da curva “S”:

A definição da curva S é dada por

$$F(t) = b \frac{e^{\frac{t-c}{a}}}{e^{\frac{t-c}{a}} + e^{\frac{t-c}{a}}}, \quad (\text{A.3})$$

em que  $t$  é o ano inicial,  $b$  é o valor assintótico máximo (até quanto a tecnologia pode atingir ou ainda, fração máxima),  $c$  é o tempo para o qual 50% do mercado é atingido (metade do mercado é representado por metade do máximo expresso em  $b$ ), e  $a$  é o parâmetro que define a velocidade de captura do mercado.

### 3) Crescimento da capacidade de condução de corrente das fitas:

Foi modelada a partir de um crescimento linear, representado através de uma reta, que segue a equação

$$y = ax + b \quad (\text{A.4}),$$

Onde “a” é o coeficiente angular, calculado de acordo com os valores mínimo e máximo especificados para a evolução da fita e “b” é o coeficiente linear.

### 4) Energia potencialmente economizável:

Esta parcela representa a energia que poderia ser economizada, considerando-se que os dispositivos utilizando supercondutores de alta temperatura pudessem mitigar todas as perdas, resultando em

$$\text{Energia potencialmente economizável} = \text{fator de penetração} \times \text{consumo futuro de energia} \quad (\text{A.5}).$$

### 5) Energia efetivamente economizada:

É o valor que representa a energia que realmente pode ser economizada quando da comparação de um dispositivo tradicional com um utilizando supercondutores de alta temperatura. Considera o fato de que nem toda perda pode ser eliminada, e ainda que existe uma perda criogênica a ser considerada, levando a

$$\text{Energia efetivamente economizada} = \text{Energia potencialmente economizável} \times \text{fator de economia de cada equipamento} \quad (\text{A.6}).$$

### 6) Custo da energia evitada:

$$\text{Custo da energia evitada} = \text{energia efetivamente economizada} \times \text{custo da energia elétrica} \quad (\text{A.7}).$$