COPPE
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
UFRJ

MATERIALIZAÇÃO DA NDC BRASILEIRA: A DEMANDA POR MATERIAIS CRÍTICOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Lucas Bittencourt Romero de Barros

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
Roberto Schaeffer

Rio de Janeiro
Março de 2026

MATERIALIZAÇÃO DA NDC BRASILEIRA:
A DEMANDA POR MATERIAIS CRÍTICOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Lucas Bittencourt Romero de Barros

DISSERTAÇÃO 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 MESTRE EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

_____

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

_____

Prof. Roberto Schaeffer, D.Sc.

_____

Prof. Laurent Drouet, D.Sc.

_____

Marianne Zanon Zotin., D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
MARÇO DE 2026

Barros, Lucas Bittencourt Romero de

Materialização da NDC brasileira: A demanda por materiais críticos para a transição energética/ Lucas Bittencourt Romero de Barros – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2026.

XVII, 170 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2026.

Referências Bibliográficas: p. 161-181.

1. Materiais Críticos. 2. NDC Brasileira. 3. Transição Energética. I. Szklo, Alexandre Salem *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

À Patrícia e à nossa família.

AGRADECIMENTOS

Essa dissertação só existe porque, pela obra do acaso, um edital extraordinário para ingresso no programa de Planejamento Energético calhou de abrir logo após meu inesperado retorno ao Brasil. Mesmo que eu já desejasse cursar esse programa há algum tempo, foi a minha esposa quem mais se entusiasmou com essa possibilidade e só sossegou depois que eu me candidatasse. Assim, só poderia ser para ela o meu primeiro agradecimento. Além de me motivar ao longo dessa jornada, me aguentou durante a árdua tarefa de dar vida a este trabalho. Patrícia, sem você, tudo seria mais difícil.

O motivo da minha longa vontade de fazer esse mestrado, além dos excelentes trabalhos aqui publicados, são os igualmente excelentes professores. Ainda que todos sejam dignos de nota, gostaria de mencionar, em especial, aqueles que aceitaram me orientar, Alexandre e Roberto. Antes de conhecê-los, não sabia o que esperar. Em vez do estereótipo de acadêmicos brilhantes, mas socialmente inaptos, revelaram seus pujantes lados humanos. O Alexandre parece a encarnação da frase, comumente atribuída a Jung, "Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana". Já o Roberto é, além de referência acadêmica, um exemplo pessoal. Seu bom humor, suas piadas oportunas, e sua capacidade de ponderação revelam mais que sua inteligência, mas também sua grandeza de espírito.

Agradeço, também, ao Cebri pelo financiamento do projeto MCE, que deu origem a esse trabalho, bem como à Capes, pelo apoio financeiro que me possibilitou dedicação exclusiva durante o mestrado.

Naturalmente, o tanto que aprendi ao longo desses mais de dois anos também é fruto do convívio com os colegas do PPE e do laboratório Cenergia. Um agradecimento especial aos meus colegas Victor, Igor e Fábio A., que tanto contribuíram para esse trabalho, seja durante a pesquisa, seja com boas reflexões. Já ao Luiz Bernardo, sempre solícito, além de sua contribuição para o trabalho, agradeço também pela sua generosidade em me guiar pelos caminhos, muitas vezes pantanosos, da vida acadêmica. Impossível não agradecer, também, à Sandrinha, principal engrenagem do PPE.

Por fim, um agradecimento aos meus amigos e à minha família, que trataram de me proporcionar merecidos momentos de lazer e sempre se fizeram presente quando eu precisei. Meus pais, meus irmãos, meus sobrinhos, minhas avós; os grupos BBG, da escola, do Fluminense, da vida: todos deixaram uma marca em mim e, portanto, também nessa dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Planejamento Energético (M.Sc.).

MATERIALIZAÇÃO DA NDC BRASILEIRA:
A DEMANDA POR MATERIAIS CRÍTICOS PARA A TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Lucas Bittencourt Romero de Barros

Março/2026

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Programa: Planejamento Energético

A transição para uma economia de baixo carbono implica transformações estruturais não apenas no sistema energético, mas também em sua base material. Tecnologias de baixo carbono demandam volumes crescentes de materiais críticos, tornando a descarbonização simultaneamente uma transição energética e material. Esta dissertação estima a demanda por materiais críticos associados ao cumprimento da segunda Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) brasileira a partir do pós-processamento dos resultados do modelo nacional de Avaliação Integrada Brazilian Land-Use and Energy Systems (BLUES). A metodologia combina projeções de expansão tecnológica com intensidades materiais específicas para estimar a demanda incorporada em bens de capital do setor energético, com ênfase em transportes e na geração elétrica. Foram construídos três cenários contrastantes: Business as Usual (BAU), Disrupção Tecnológica (DT) e Restrição Material (RM), permitindo avaliar a sensibilidade da demanda material a diferentes trajetórias subtecnológicas. Os resultados indicam que a eletrificação do setor de transportes é o principal vetor de crescimento da demanda por materiais críticos, com destaque para lítio, níquel, grafite, manganês e cobre. Ademais, diferentes escolhas tecnológicas alteram significativamente o perfil, o volume e a criticidade da demanda. Ao "materializar" a NDC brasileira, o trabalho evidencia a importância de incorporar restrições materiais ao planejamento energético de longo prazo e contribui para o debate sobre segurança de suprimento e política industrial no contexto da transição energética.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Energy Planning (M.Sc.).

MATERIALIZING THE BRAZILIAN NDC:
CRITICAL MATERIAL DEMAND FOR THE ENERGY TRANSITION

Lucas Bittencourt Romero de Barros

Março/2026

Advisors: Alexandre Salem Szklo

Roberto Schaeffer

Department: Energy Planning

The transition to a low-carbon economy entails structural transformations not only in the energy system but also in its material basis. Low-carbon technologies require increasing volumes of critical materials, making decarbonization both an energy and a material transition. This dissertation estimates the demand for critical materials associated with achieving Brazil's second Nationally Determined Contribution (NDC) through the post-processing of results from the national Integrated Assessment Model Brazilian Land-Use and Energy Systems (BLUES). The methodology combines projected technological expansion with technology-specific material intensities to estimate the material demand embedded in energy sector capital goods, with emphasis on transport and on electricity generation. Three contrasting scenarios were developed – Business as Usual (BAU), Technological Disruption (TD), and Material Constraint (MC) – to assess the sensitivity of material demand to different sub-technological pathways. Results indicate that transport electrification is the main driver of growth in critical material demand, particularly for lithium, nickel, graphite, manganese and copper. Moreover, different technological choices significantly affect the composition, magnitude and the criticality of material requirements. By "materializing" Brazil's NDC, this research highlights the importance of incorporating material constraints into long-term energy planning and contributes to the debate on supply security and industrial policy in the context of the energy transition.

SUMÁRIO

1. Sumário

1. Sumário viii

1. Introdução 1

1.1. Contextualização do problema: Acordo de Paris e as NDCs 1

1.1. As NDCs brasileiras 4

1.2. A segunda NDC brasileira 7

2. Materiais Críticos e a Transição Energética 13

2.1. Preâmbulo 13

2.2. Histórico 14

2.2.1. Origem e institucionalização do conceito (1917 -1945) 14

2.2.2. Pós-guerras mundiais (1945 – 1970) 17

2.2.3. Uma nova visão de criticidade (1970 até o fim da guerra fria) 18

2.2.4. Pós-guerra fria a 2008 20

2.2.5. Nova fase dos materiais críticos (2008 até os dias atuais) 23

2.2.6. Criticalidade e a transição energética 25

2.3. Sobre a natureza dos materiais críticos 26

2.3.1. Abundância elementar – Raridade Física vs. Escassez 26

2.3.2. Recursos naturais vs. reservas 29

2.3.3. Minerais vs. M inérios 32

2.3.4. Companheirismo mineral (Companionality) 35

2.3.5. Características de mercado dos metais companheiros 36

2.4. Substituição de materiais: tipologias, limitações e implicações econômicas 38

2.4.1. Substituição material-material (elemento-elemento) 39

2.4.2. Substituição qualidade-por-elemento 40

2.4.3. Substituição de processos-por-elemento 41

2.4.4. Substituição interproduto....41
3. Conversores energéticos associados a materiais críticos....44
3.1. Baterias veiculares e estacionárias....44
3.1.1. Baterias convencionais....46
3.1.1.1. Família do chumbo - Baterias de Chumbo-ácido (Pb-ácido)....46
3.1.1.2. Família do Níquel - Baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) e Hidreto de Níquel metálico (NiMH....48
3.1.1.3. Baterias de íon-lítio (Li-íon)....49
3.1.1.4. Família de baterias de sódio - Baterias sódio-β e Baterias de Íon-Sódio 52
3.1.2. Baterias de fluxo....54
3.1.2.1. Baterias de fluxo redox de vanádio (VRFB)....55
3.1.3. Avaliação Geral....56
3.2. Pilhas a Combustível....56
3.2.1. Pilha a combustível de membrana de troca protônica (PCMTP)....57
3.2.2. Pilha a combustível alcalina (PCA)....58
3.2.3. Pilhas a combustível de ácido fosfórico (PCAF)....58
3.2.4. Pilha a combustível de óxido sólido (PCOS)....59
3.2.5. Pilha a combustível de carbonato fundido (PCCF)....59
3.2.6. Avaliação Geral....59
3.3. Motores Elétricos....60
3.3.1. Motores de corrente contínua com escovas (BDCM)....60
3.3.2. Motores assíncrono de indução (IM)....61
3.3.3. Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSM)....61
3.3.4. Motores de Corrente Contínua Sem Escovas (BLDC)....62
3.3.5. Motor Síncrono com excitação elétrica (EESM)....63
3.3.6. Motor Síncrono de Relutância Comutada (SRM)....63
3.3.7. Avaliação Geral....63

3.3.7.1. Parâmetros Operacionais 64
3.3.7.2. Parâmetros de Desempenho.....65
3.3.7.3. Parâmetros Econômicos 66
3.3.7.4. Performance geral.....67
3.4. Geradores de Turbinas Eólicas.....68
3.4.1. Tipos de geradores.....69
3.4.2. Geradores por indução com rotor em gaiola de esquilo (SQIG) 69
3.4.3. Geradores De Indução Com Rotor Bobinado (WRIG) 70
3.4.4. Geradores por indução duplamente alimentados (DFIG).....70
3.4.5. Geradores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSG) 71
3.4.6. Geradores Síncronos Eletricamente Excitados (EESG) 72
3.4.7. Avaliação geral 73
3.4.7.1. Parâmetros operacionais 73
3.4.7.2. Parâmetros construtivos.....74
3.4.7.3. Parâmetros econômicos 75
3.4.7.4. Performance geral.....76
3.5. Painéis Fotovoltaicos.....77
3.5.1. Painéis de 1ª geração – Camadas únicas (Wafer).....77
3.5.2. Painéis de 2ª geração – Filmes finos 78
3.5.3. Painéis de 3ª geração 79
3.5.3.1. Células multijunções III-V 79
3.5.3.2. Células Fotovoltaicas Orgânicas (OPV) e Células sensibilizadas por corantes (DSSC) 80
3.5.3.3. Células Perovskite 80
3.5.4. Avaliação Geral 81
4. Metodologia.....82
4.1. Cenário utilizado do modelo BLUES.....83

4.2. Premissas dos subcenários e da seleção das subtecnologias 85
4.2.1. Cenário Business as Usual.....85
4.2.1.1. Baterias veiculares e estacionárias - BAU.....85
4.2.1.2. Pilhas a combustível - BAU 87
4.2.1.3. Motores elétricos - BAU.....88
4.2.1.4. Geradores eólicos - BAU.....89
4.2.1.5. Energia solar - BAU 91
4.2.2. Cenário de Disrupção Tecnológica (DT).....92
4.2.2.1. Baterias - DT 92
4.2.2.2. Pilhas a combustível - DT 94
4.2.2.3. Motores elétricos - DT.....94
4.2.2.4. Geradores eólicos - DT.....95
4.2.2.5. Energia solar - DT 96
4.2.3. Cenário de Restrição Material (RM) 97
4.2.3.1. Criticidade das tecnologias no cenário de Restrição Material.....97
4.2.3.2. Baterias – RM.....100
4.2.3.3. Pilhas a combustível - RM.....101
4.2.3.4. Motores elétricos - RM.....101
4.2.3.5. Geradores eólicos - RM.....102
4.2.3.6. Energia solar - RM 103
4.3. Estimativa de Demanda de Elementos 104
4.3.1. Pós-processamento dos resultados do BLUES para o setor de transportes 105
4.3.2. Veículos elétricos 107
4.3.3. Baterias para Armazenamento Estacionário.....108
4.3.4. Geradores de Turbinas Eólicas.....109
4.3.5. Painéis Fotovoltaicos.....109

5. Resultados e Discussões 110
5.1. Resultados do modelo BLUES 110
5.1.1. Trajetória energética e de emissões 110
5.1.2. Setor elétrico 112
5.1.3. Setor de transportes 115
5.1.4. Rotas tecnológicas identificadas e volume de controle adotado 117
5.2. Resultados da demanda material 118
5.2.1. Análise de Criticidade 121
5.2.2. Demanda incremental 122
5.2.3. Oferta vs. demanda 130
5.2.3.1. Demanda incremental vs. Produção global 135
5.2.4. Demanda Acumulada vs. Reservas 137
6. Conclusão 140
4.1. Limitações e Recomendações para trabalhos futuros 142
7. Referências 145
Anexo 1 – Modelos de Avaliação Integrada (IAMs) 172
Tipologias de IAMs 173
O modelo BLUES 175
Anexo 2 – Criticidade Elementar 177
Anexo 3 – Intensidade material 178
Anexo 4 – Criticalidade tecnológica 1

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Série Histórica de emissões líquidas de gases de efeito estufa em milhares de toneladas de CO2 equivalente (base GWP100, AR5) por setor 7

Figura 2- Posição geográfica da mineração 1850 – 2025.....22

Figura 3 - Abundância relativa dos elementos químicos na crosta terrestre superior em função do número atômico. 28

Figura 4 - Diagramas de McKelvey. 30

Figura 5 - Definições Padrão CRIRSCO.....31

Figura 6 – "Total Resource Box". 32

Figura 7 - Produção de companheiros minerais a partir dos seus principais elementos hospedeiros. 35

Figura 8 – Frota remanescente de veículos 107

Figura 9 - Oferta de energia primária por fonte energética. 110

Figura 10 - Emissões líquidas de GEE e contribuição por setor e emissões líquidas de CO2. 112

Figura 11 - Matriz elétrica brasileira para o período de 2025 a 2050. 113

Figura 12 - Instalação e aumento de capacidade de energia solar, energia eólica onshore e de capacidade de armazenamento de energia estacionária. 114

Figura 13 - Demanda por mobilidade de acordo com tipo de veículo. 116

Figura 14 - Gráfico cascata do aumento de estoque de veículos elétricos 117

Figura 15 - Parâmetros operacionais dos motores elétricos. 65

Figura 16 - Parâmetros de performance dos motores elétricos. 66

Figura 17 - Parâmetros econômicos dos motores elétricos. 67

Figura 18 - Pontuação geral dos motores elétricos para escolha da família tecnológica. 68

Figura 19 - Parâmetros operacionais das famílias de geradores utilizados em turbinas eólicas. 74

Figura 20 - Parâmetros construtivos das famílias de geradores utilizados em turbinas eólicas 75

Figura 21 - Parâmetros econômicos das famílias de geradores utilizados em turbinas eólicas. 76

Figura 22 - Pontuação geral dos geradores elétricos para escolha da família tecnológica. 77

Figura 23 - Evolução da participação do mercado das baterias no setor de transporte - Cenário BAU. 86
Figura 24 - Evolução da participação do mercado das baterias para o armazenamento estacionário de energia - Cenário BAU. 87
Figura 25 - Evolução da participação de mercado de motores elétricos no setor de transporte no período de 2025 a 2050 - Cenário BAU. 89
Figura 26 - Evolução da participação de geradores elétricos no setor Eólico Onshore no período de 2025 a 2050 - Cenário BAU. 90
Figura 27 - Evolução da participação de das subtecnologias de geração solar centralizada e descentralizada no período de 2025 a 2050 - Cenário BAU. 92
Figura 28 - Evolução da participação do mercado das baterias no setor de transporte - Cenário DT. 93
Figura 29 - Evolução da participação do mercado das baterias para o armazenamento estacionário de energia - Cenário DT. 94
Figura 30 - Evolução da participação de mercado de motores elétricos no setor de transporte no período de 2025 a 2050- Cenário DT. 95
Figura 31 - Evolução da participação de geradores elétricos no setor Eólico Onshore no período de 2025 a 2050 - Cenário DT. 96
Figura 32 - Evolução da participação de das subtecnologias de geração solar centralizada e descentralizada no período de 2025 a 2050 - Cenário DT. 97
Figura 33 - Evolução da participação do mercado das baterias no setor de transporte - Cenário RM 100
Figura 34 - Evolução da participação do mercado das baterias para o armazenamento estacionário de energia - Cenário RM. 101
Figura 35 - Evolução da participação de mercado de motores elétricos no setor de transporte no período de 2025 a 2050 - Cenário RM. 102
Figura 36 - Evolução da participação de geradores elétricos no setor Eólico Onshore no período de 2025 a 2050 - Cenário RM. 103
Figura 37 - Evolução da participação das subtecnologia de geração solar centralizada e descentralizada no período de 2025 a 2050 - Cenário RM. 104
Figura 38 - Demanda de materiais acumulada 2025 - 2025. Dados em milhares de toneladas. 119
Figura 39 – Demanda material acumulada dos elementos, distribuídas de acordo com suas ordens de grandeza. Dados em milhares de toneladas. 120

Figura 40 – Gráfico a esquerda: Criticidade relativa dos cenários em comparação com o cenário BAU. Gráfico à direita: contribuição elementar de criticidade em cada cenário. 121

Figura 41 - Demanda material acumulada entre 2025-2050 por setor em cada cenário 122

Figura 42 - Demanda incremental por período por cenário. Demanda em milhares de toneladas. Nota: Os elementos não estão agrupados pela faixa de ordem de grandeza da demanda, mas sim para facilitar a visualização das demandas.....124

Figura 43 - Demanda Incremental dos elementos utilizados em baterias. Valores em milhares de toneladas.....126

Figura 44 - Demanda incremental de cobre e de ímãs permanentes em geradores eólicos e em motores elétricos. Valores em milhares de toneladas.....127

Figura 45 - Demanda material incremental do setor solar. Demanda expressa em milhares de toneladas.....129

Figura 46 - Demanda material incremental do setor de transportes em milhares de toneladas. 129

Figura 47 - Materiais cuja demanda incremental supera 10% da produção brasileira em algum momento do período analisado no cenário BAU. Demanda em milhares de toneladas.....133

Figura 48- Materiais cuja demanda incremental supera 10% da produção brasileira em algum momento do período analisado no cenário RM. Demanda em milhares de toneladas. 134

Figura 49 - Materiais cuja demanda incremental supera 10% da produção brasileira em algum momento do período analisado no cenário DT. Demanda em milhares de toneladas. 135

Figura 50 - Materiais cuja demanda incremental supera 5% da produção mundial em algum momento do período analisado no cenário BAU. Demanda em milhares de toneladas. 136

Figura 51- Materiais cuja demanda incremental supera 5% da produção mundial em algum momento do período analisado no cenário RM. Demanda em milhares de toneladas. 136

Figura 52 - Materiais cuja demanda incremental supera 5% da produção mundial em algum momento do período analisado no cenário RM. Demanda em milhares de toneladas. 137

Figura 53 – Comparação da demanda acumulada com as reservas. O eixo vertical direito nos gráficos de lítio representa o percentual das reservas brasileiras. 138

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Premissas gerais adotadas para o cenário da segunda NDC brasileira 83

Tabela 2 - Principais premissas adotadas para o setor energético brasileiro no cenário da segunda NDC brasileira 84

Tabela 3 - Principais premissas adotadas para o uso do solo no cenário da segunda NDC brasileira. 84

Tabela 4 - Parâmetros avaliados e critérios para atribuição da nota de criticidade elementar 98

Tabela 5 - Criticidade tecnológica 99

Tabela 6 - Parâmetros médios utilizados para cálculo da frota de veículos. 106

Tabela 7 - Curvas de Sucateamento por Categoria de Veículos. 107

Tabela 8 - Parâmetros (Fk) utilizados para o cálculo da demanda material das tecnologias associadas a veículos elétricos. 108

Tabela 9 - Diferenciação das baterias convencionais em relação ao catodo, anodo e eletrólito. 45

Tabela 10 - Comparação entre os diferentes tipos de baterias 56

Tabela 11 - Comparação entre diferentes pilhas a combustível. 59

Tabela 12 - Comparação dos diferentes tipos de células solares. Nota: CTP – Coeficiente de Temperatura e Potência; MSP – Mínimo preço sustentável; LCOE – Custo nivelado de energia 81

Tabela 13 – Atribuição da criticidade dos elementos avaliados. 177

Tabela 14 - Intensidade material para baterias (kg/kWh) 178

Tabela 15 - Intensidade material de Pilhas à Combustível de Membrana Protônica 178

Tabela 16 - Intensidade material de ímãs Permanentes (NdFeB). 178

Tabela 17 - Intensidade material das células solares (Silício Monocristalino; Telureto de Cádmio e Disseleneto de Cobre-Indio-Gálio) 179

Tabela 18 - Intensidade material dos geradores em turbinas eólicas Onshore. .179

Tabela 19- Intensidade material em motores elétricos. Nota: A unidade do Imã permanente é em quilograma de ímã por quilograma de Motor. 179

Tabela 20 – Criticalidade da Bateria LFP. 1

Tabela 21 - Criticalidade da Bateria LMFP 1

Tabela 22 – Criticalidade da Bateria NMC-111. 1

Tabela 23 - Criticalidade da Bateria NMC-333.....1
Tabela 24 - Criticalidade da Bateria NMC-532.....1
Tabela 25 - Criticalidade da Bateria NMC-622.....1
Tabela 26 – Criticalidade da Bateria NMC-811.....1
Tabela 27 - Criticalidade da Bateria NMC-955.....1
Tabela 28 - Criticalidade da Bateria NCA.....1
Tabela 29 - Criticalidade da Bateria Chumbo-Ácido.....2
Tabela 30 - Criticalidade da Bateria Íon-Sódio.....2
Tabela 31- Criticalidade da pilha a combustível PEMFC.....2
Tabela 32 – Criticalidade do Motor IM.....2
Table 33 – Criticalidade do Motor SRM.....2
Tabela 34 - Criticalidade do motor PMSM.....2
Tabela 35 – Criticalidade da célula Mono-Si.....2
Tabela 36 – Criticalidade da célula Perovskite/Si.....2
Tablea 37 - Criticalidade da célula CdTe.....2
Tabela 38 - Criticalidade da célula CIGS.....3
Tabela 39 – Criticalidade do Gerador DFIG.....3
Tabela 40 – Criticalidade do Gerador PMSG-DD.....3
Tabela 41 – Criticalidade do Gerador PMSG-1G.....3
Tabela 42 – Criticalidade do Gerador PMSG-3G.....3
Tabela 43 – Criticalidade do Ímã Permanente NdFeB.....3

1. Introdução

1.1. Contextualização do problema: Acordo de Paris e as NDCs

A mudança climática é uma das maiores ameaças para a segurança econômica mundial e para a estabilidade social no século XXI (ZHANG et al, 2023; BALCILAR et al., 2025). Tal mudança é inequivocadamente associada à atividade humana, cuja dependência de combustíveis fosseis teve papel determinante para a emissão e consequente concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, elevando a temperatura média global em aproximadamente 1,1°C em relação ao período pré-industrial até 2020 (FU et al., 2022; IPCC, 2023, HOLLNAICHER, 2025). A Organização de Meteorológica Mundial (WMO) destaca que os últimos dez anos (2015-2024) são justamente os dez anos mais quentes já registrados[1], além de apontar que o ano de 2024 foi o primeiro, cuja média global ultrapassou 1,5°C em relação à média do período 1850-1900[2] (WMO, 2025).

Como resposta a essa ameaça, a comunidade internacional concentra seus esforços na adaptação e mitigação da mudança do clima por meio de acordos multilaterais celebrados nas Conferências das Partes (COP) (CEBRI, 2023). A COP 21 celebrou o Acordo de Paris, que define três principais objetivos. Notadamente: limitar o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C acima dos níveis pré-industriais, com esforços de limitar em até 1,5°C acima dos níveis pré-industriais até 2100[3]; aumentar a capacidade de adaptação aos impactos adversos do aquecimento global, gerando resiliência climática; e fomentar fluxos financeiros compatíveis com os objetivos de mitigação de GEE e de resiliência climática (UNFCCC, 2015).

---

[1] A série história de dados observados começou em 1850, completando 175 anos em 2025.

[2] Importa destacar que ultrapassar o limite de 1,5°C em um único ano não significa o não cumprimento do acordo de Paris. A temperatura média global referenciada no acordo leva em consideração a média de décadas (UNFCCC, 2022), a fim de considerar flutuações climáticas por fatores como El Niño e La Niña, atividade vulcânica e mudanças na circulação do oceano (WMO, 2025). Atualmente, a WMO considera que o aquecimento global de 1,5°C só seria confirmado se considerada a média de um período de 20 anos, sendo definido pelo ponto médio deste período. Assim, é reconhecido que haveria um hiato de ao menos 10 anos para o reconhecimento não cumprimento do acordo (WMO, 2025). Atualmente, a média de temperatura global está na faixa de 1,34°C a 1,41°C acima dos níveis pré-industriais (WMO, 2025).

[3] O acordo de Paris em seu molde atual permite que se ultrapasse temporariamente este limite, desde que haja o retorno da temperatura média global para 1,5°C em 2100. Tal cenário é caracterizado como "overshooting". Ainda assim, as consequências de se ultrapassar essa meta mesmo que temporariamente e de se atingir pontos de não retorno ("tipping points") seriam irreparáveis.

Atualmente, o principal mecanismo para o cumprimento do acordo de forma a respeitar o princípio de responsabilidade comum, porém diferenciada segundo as respectivas capacidades nacionais[4] (CBDRC) são as contribuições nacionalmente determinadas (NDCs). As NDCs são compromissos de mitigação de GEE firmados pelas nações signatárias de maneira voluntária. Ficou estabelecido que elas devem ser renovadas a cada 5 anos, com metas de emissões progressivamente restritivas (UN, 2015). Assim, antes mesmo da assinatura do acordo de Paris, as COPs 19 e 20 em Varsóvia e em Lima, respectivamente, convidaram os países a prepararem pretensas NDCs (intended NDCs ou iNDCs) de maneira a antecipar os esforços necessários para o instrumento legal que viria a ser firmado na COP 21 (UNFCCC, 2013; UNFCCC, 2014). As iNDCs deveriam, então, ser submetidas em 2016, enquanto a 1ª NDC de cada país deveria ser elaborada para submissão em 2020. A segunda rodada de submissão ocorreria 5 anos depois, em 2025, e assim sucessivamente. Em última análise, as NDCs representam as ambições climáticas de cada nação para a concretização do acordo de Paris.

Para balizar a eficácia das NDCs firmadas em relação a meta climática, e conforme previsto no artigo 14 do próprio acordo de Paris, passou-se a realizar um balanço global (Global Stocktake, ou GST) a partir da COP 28, 2023, realizada nos Emirados Árabes Unidos. Este balanço, realizado na forma de inventário, ocorre na mesma periodicidade das NDCs, isto é, a cada 5 anos, e deve ser a principal referência para o firmamento das novas contribuições nacionalmente determinadas.

Em síntese, o acordo de Paris utiliza uma abordagem "bottom-up" de "pledge-and-review", na qual países definem voluntariamente suas propostas de mitigação ("pledges") e a soma das contribuições nacionais propostas é cruzada de periodicamente com a meta climática do acordo ("review"). (Fu et al., 2022). Esse confrontamento busca orientar o esforço agregado a partir do reconhecimento das lacunas de ambição e de implementação para os ciclos seguintes de NDCs.

[4] A primeira COP, realizada em Bonn, 1993, estabeleceu 5 princípios a serem utilizados como diretrizes. O CBDRC foi desenvolvido buscando equidade, sob o reconhecimento das diferenças significativas entre as contribuições históricas para a emissão de GEE e as respectivas capacidades de contribuir para uma solução, dada as suas realidades sociais e econômicas. Esse princípio foi decisivo para o entendimento que países desenvolvidos devem liderar os esforços para o combate à mudança climática, evitando que esse fardo recaia sobre países em desenvolvimento.

Esse processo de freios e contrapesos é, de fato, importante, pois não há garantia de que o somatório das emissões de todas as NDCs, se implementadas, resulta no cumprimento do acordo de Paris. Tampouco garante-se que as políticas correntes voltadas ao combate ao aquecimento global estão alinhadas com as metas de contribuição autoimpostas pelos países signatários (FU et al., 2022). Com efeito, é isto que corrobora a publicação anual do programa ambiental das Nações Unidas (UNEP) em seu relatório "Emissions Gap Report". Nele é analisado o descompasso entre estes três cenários – políticas correntes, NDCs plenamente implementadas e cumprimento do acordo de Paris.

Segundo o último "Emissions Gap Report"[5], as políticas correntes elevariam a temperatura global média em 2,8°C, enquanto a implementação das NDCs levaria ao aquecimento de 2,3 – 2,5°C em relação a níveis pré-industriais (UNEP, 2025). Ainda que seja inegável a ação climática instigada pelo acordo de Paris, evidenciado pelas recorrentes reduções da defasagem entre esses cenários, o relatório aponta que é preciso avançar nos esforços de mitigação para o cumprimento do acordo.

Similarmente, o primeiro GST realizado constatou o progresso coletivo entre o aquecimento global esperado antes e depois do acordo de Paris. Não obstante, ele ressalta a descoberta do 6° Relatório de avaliação (AR6) do painel intergovernamental de mudança climática (IPCC), que indica uma potencial lacuna entre as políticas implementadas e as NDCs até 2020. Ademais, o GST nota com preocupação que, apesar do progresso realizado até o momento, as trajetórias dos GEE não estão em linha com as metas estabelecidas na COP 21 (UNFCCC, 2023).

Dentre os marcos do primeiro balanço global e da COP 28, destaca-se a chamada para que os países considerarem em suas próximas NDCs a transição para que se abandone[6] ("transition away from") os combustíveis fósseis dos sistemas energéticos de maneira justa, ordenada e equitativa, acelerando a ação nesta década crítica, de forma a zerar emissões líquidas em 2050, em linha com a ciência. Além de reconhecer a

[5] O relatório foi publicado em Novembro de 2025, mesmo mês de publicação da nova NDC brasileira. Dessa forma a nova NDC brasileira não foi atualizada a tempo da elaboração do Emissions Gap Report de 2025 e, portanto, não foi contabilizada.

[6] Essa tradução livre baseia-se na versão do relatório em Espanhol, uma das 5 línguas oficiais da Organização das Nações Unidas: "Llevar a cabo uma transición que deje atrás los combustibles fósiles en los sistemas energéticos, de forma justa, ordenada y equitativa, acelerando la acción em esta década crucial, com el fin de lograr el cero neto em emisiones de aqui a 2050, de conformidade com la ciencia".

necessidade de renunciar o uso de combustíveis fósseis pela primeira vez, o apelo para zerar emissões líquidas até 2050 e o pedido para que se desenvolva estratégias alinhadas com esse objetivo de longo-prazo foram essenciais para o ciclo seguinte das NDCs, incluindo, também, o desenvolvimento da segunda NDC brasileira.

1.2. As NDCs brasileiras

O Brasil enviou a sua pretensão de contribuição nacionalmente determinada (iNDC) em 2015, antecipando as metas climáticas que pretendia estabelecer em sua NDC. Ao ratificar o documento junto ao congresso nacional em 2016, um dos primeiros países a fazê-lo, alçou seu status ao de 1ª NDC brasileira. No documento constavam o ano base de comparação, o tipo de meta e a métrica escolhida para comparação.

Em um primeiro momento, a meta climática parece significativa, pois estabelece uma redução robusta em relação às emissões líquidas absolutas de GEE de 2005 de 37% e 43% em 2025 e 2030, respectivamente. Anexado à iNDC, constava uma "informação adicional" destinada "exclusivamente a prestar esclarecimentos adicionais". Nela, as metas de emissões absolutas eram especificadas – 1,3 $GtCO_2eq$ em 2025 e 1,2 $GtCO_2eq$ em 2030. A meta brasileira considerava a totalidade do território brasileiro, incluindo todos os setores da economia. A métrica de emissões, por sua vez, levava em conta o potencial de aquecimento global de 100 anos (GWP_{100}), utilizando os valores disponibilizados pelo 5° relatório de avaliação do IPCC (AR5) e a base utilizada referenciava o inventário nacional realizado para a segunda comunicação nacional do Brasil à UNFCCC, isto é, 2,19 $GtCO_2eq$ em 2005[7] (BRASIL, 2015).

Além disso, a iNDC destacava o fato de as metas brasileiras não serem condicionadas a ações ou financiamento externo, ao mesmo tempo em que sugere iniciativas Sul-Sul, com o objetivo de fortalecer a cooperação com outros países em desenvolvimento. Ao assumir um compromisso climático incondicional e estender apoio a outras nações em desenvolvimento, apesar de ainda enfrentar desafios econômicos e

[7] A escolha do ano base de comparação, no entanto, foi estratégica, pois o ano de 2005 representa a quarta maior emissão da série histórica brasileira. O setor de maior destaque em relação às emissões brasileiras é o de uso do solo, mudança do solo e floresta (LULUCF), como representado na Figura 1. Essa característica é intimamente relacionada ao desmatamento, em especial da Amazônia. Segundo dados do Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE), juntos, os estados do Pará e do Mato Grosso foram responsáveis por 58,8% das emissões de LULUCF entre 1990 e 2022 (MCTI, 2025).

sociais característicos desse grupo de países, o Brasil sinaliza sua ambição de se consolidar como um dos líderes globais na agenda de enfrentamento às mudanças climáticas.

Em 2020, ano que os países deveriam submeter oficialmente suas NDCs, o Brasil reafirma as metas estabelecidas para 2025 e 2030 (redução de emissões líquidas absolutas de 37% e 43% em relação ao ano base de 2005, respectivamente), enviando uma NDC atualizada. Essa NDC, no entanto, encontrava-se perante um fato novo - a revisão do inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa. Mudanças metodológicas no inventário, utilizando novos dados de atividades e fatores de emissão para estimar as emissões e remoções de gases de efeito estufa, em particular no setor de LULUCF, elevaram as estimativas de emissões nacionais. A principal mudança metodológica foi a atualização dos mapas de carbono de biomassa de diferentes tipos de vegetação em cada bioma, além da mudança dos fatores de emissão oriundas do desmatamento.

Assim, as emissões do ano base, 2005, passaram de 2,19 $GtCO_2eq$ para 2,74 $GtCO_2eq$, um aumento de 25%. Consequentemente, as novas metas absolutas do Brasil aumentaram na mesma proporção, totalizando um incremento de 0,34 $GtCO_2eq$ em 2025 e de 0,31 $GtCO_2eq$ em 2030. A revisão submetida durante o governo Bolsonaro (2019-2022) representava, então, um retrocesso da ambição climática brasileira[8].

A revisão das NDCs é um direito das partes e pode ocorrer a qualquer momento, contanto que ela venha acompanhada do aumento do nível de ambição, conforme explicitado no artigo 11 do acordo de Paris (UN, 2015). A NDC atualizada rompia diretamente com este artigo ao aumentar as emissões líquidas absolutas dos anos 2025 e

[8] O retrocesso da ambição climática brasileira coincide com o período do governo Bolsonaro como presidente da república. Apesar de não ter levado a cabo algumas de suas propostas de campanha como a de fundir o Ministério do Meio Ambiente com o Ministério da Agricultura e a da retirada do Brasil do acordo de Paris (BRASIL DE FATO, 2018; RODRIGUES, 2022), seu regime foi marcado pelo negacionismo climático e pelo desmonte intencional da pauta ambiental (DEUSTSCH, 2021; TONI E CHAVES, 2022; QUEIROZ-STEIN et al., 2023). Além disso, a postura explicitamente contrária à agenda ambiental adotada pelo governo contribuiu para a ampliação de práticas ilegais. Com apoio de setores ruralistas, o governo federal promoveu diversas iniciativas para reverter avanços anteriores em conservação ambiental, incluindo propostas legislativas e presidenciais que beneficiavam a grilagem de terras, autorizavam a mineração em terras indígenas e reduziam áreas de unidades de conservação. Paralelamente, houve a nomeação de indicados políticos – em sua maioria militares – para cargos de direção nos órgãos ambientais (IBAMA e ICMBio), com o objetivo de fragilizar a capacidade de fiscalização, frequentemente retratada pelo próprio presidente como uma "indústria de multas" (NUNES et al., 2024). DEUTSCH (2021) relaciona esse movimento como parte de uma estratégia de reestruturação das instituições estatais para remover barreiras à acumulação capitalista, típicas do estatismo autoritário.

2030. Outro fator relevante do documento é a inclusão do objetivo de longo prazo ("long term objective") de neutralidade climática em 2060[9]. No entanto, o documento causa estranhamento ao sugerir que parte do financiamento requerido para que se supere os desafios para atingir seu objetivo de longo prazo venha por meio de transferências financeiras externas, conflitando, também, com o aspecto incondicional da NDC anterior.

Em 2022, o Brasil submete sua segunda atualização da NDC, desta vez aumentando a meta de mitigação de GEE de 2030 de 43% para 50% relativos à 2005. Novamente, a mudança das emissões do ano base, agora considerando a quarta comunicação nacional à UNFCCC, que reduzia o valor de emissões líquidas em 2005 para 2,45GtCO_2eq. Apesar de representar progresso em relação à atualização anterior, esse aumento mantinha as metas de 2025 aquém do que fora estabelecido na primeira NDC brasileira, ainda infringindo o princípio de progressividade e de não retorno das NDCs estabelecidos no acordo de Paris. O objetivo de longo prazo, em contrapartida, foi antecipado para 2050[10], sem menção direta sobre a necessidade de financiamento externo para o atingimento do objetivo (BRASIL, 2022).

Em 2023, o Brasil enviou sua terceira e última atualização da sua 1ª NDC. Nela, o Brasil reitera seu compromisso original de redução das emissões absolutas a 1,32 GtCO_2eq em 2025 e 1,20 GtCO_2eq em 2030, ajustando os percentuais relativos a 2005 (2,56 GtCO_2eq segundo o último inventário nacional, conforme ilustrado pela série histórica na Figura 1). Além disso, reafirma a incondicionalidade das metas propostas, ainda que considerem bem-vindas cooperações de países desenvolvidos e do eixo Sul-Sul para iniciativas complementares para o benefício global. O objetivo de neutralidade climática em 2050[11] permanece presente. Novamente, as escolhas do Brasil remetem ao

[9] A NDC brasileira atualizada em 2020 menciona tanto a neutralidade climática quanto a neutralidade de carbono em 2060, conceitos que não são equivalentes. Essa incongruência é relevante no caso brasileiro, pois grande parte das emissões de GEE decorre de CH_4 e N_2O, associados à agropecuária, gases com elevado potencial de aquecimento e sem opções viáveis de remoção antrópica. Assim, a neutralidade de carbono não é suficiente para garantir a neutralidade climática, sendo necessárias emissões líquidas negativas de CO_2 para compensar as emissões residuais dos demais GEE. Optou-se por mencionar apenas o objetivo de longo prazo mais ambicioso no texto principal, isto é, a neutralidade climática.

[10] Novamente há menção da neutralidade de carbono e climática na segunda atualização da NDC brasileira. A mesma crítica realizada na nota 8 se aplica aqui.

[11] Idem.

desejo de assumir protagonismo internacional na agenda climática, simbolicamente representada nesta última atualização da primeira NDC como “liderar pelo exemplo”.

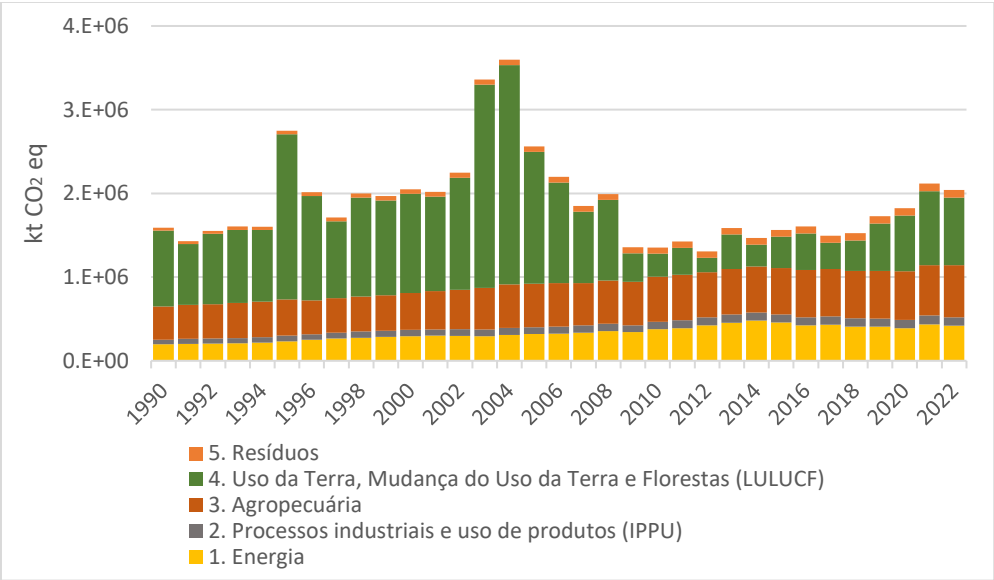


Figura 1 - Série Histórica de emissões líquidas de gases de efeito estufa em milhares de toneladas de CO2 equivalente (base GWP100, AR5) por setor

Fonte: Elaboração própria a partir de BRASIL (2024).

1.3. segunda NDC brasileira

O novo ciclo das contribuições nacionalmente determinadas estipulava que países em desenvolvimento deveriam submeter suas novas contribuições até o início de 2025. Assim, o Brasil enviou sua nova NDC no final de 2024, um ano antes da COP 30, que ocorreria em Belém, Pará, e cuja presidência caberia ao próprio país. Além de incluir uma nova meta para o ano de 2035, a segunda NDC brasileira destacou-se pelo detalhamento da Estratégia Nacional de Mitigação do Brasil. Lá são descritos os objetivos nacionais para a mitigação de GEE, as diretrizes para o cumprimento destes objetivos e as iniciativas climáticas em curso para a suportar suas metas de mitigação.

As metas para os anos de 2025 e 2030 e o objetivo de longo prazo mantiveram-se em linha com a última atualização da primeira NDC, enquanto a nova meta, para 2035, foi estabelecida em banda, representada pela faixa de emissões entre 0,85 $GtCO_2eq$ e 1,05 $GtCO_2eq$. O motivo para uma meta em banda, segundo a própria NDC, decorre da “ambição do país e o melhor conhecimento científico de planejamento de cenários apropriado para sistemas complexos e visão sistêmica”.

A adoção de uma meta em banda reconhece explicitamente a volatilidade, a incerteza e a complexidade associadas aos cenários futuros, bem como a dependência do desempenho climático brasileiro em relação a fatores imprevisíveis, de natureza doméstica e internacional. Entre esses fatores estão o grau de cooperação global, a disponibilidade de investimentos e a velocidade de desenvolvimento e difusão tecnológica. Em um cenário internacional favorável, marcado pela intensificação da cooperação e pela rápida disseminação de tecnologias limpas, o Brasil poderia alcançar o limite superior de sua ambição climática. Em contrapartida, um contexto de fragmentação da governança internacional poderia restringir o potencial do país de contribuir plenamente para os objetivos do Acordo de Paris.

No processo de elaboração da NDC, o Brasil reafirma seu compromisso com a melhor ciência disponível. O documento adota uma perspectiva holística, transversal e multidimensional, tratando meio ambiente, economia e sociedade como dimensões interdependentes. Assim, optou-se pela utilização do BLUES (Brazil Land-Use and Energy System), um modelo nacional de avaliação integrada (IAM)[12]. O modelo permite analisar de forma consistente as interações entre uso da terra, sistema energético e emissões, fornecendo a base analítica que fundamenta a NDC brasileira.

No contexto das NDCs, os IAMs oferecem vantagens específicas. Dentre elas, a capacidade de incorporar princípios como custo-efetividade nos modelos de otimização e de avaliar a viabilidade e efetividade das metas autodeterminadas são relevantes para a definição de metas realistas (VAN DE BEEK et al., 2023, HOLLNAICHER, 2025). Eles permitem identificar trajetórias de mitigação custo-efetivas, avaliar impactos econômicos setoriais e regionais (CEBRI, 2025), explorar implicações de curto e longo prazo das políticas climáticas (VAN DE VEN et al., 2023) e analisar a consistência entre metas climáticas e outros objetivos de desenvolvimento, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), mesmo que este ainda ocorra de maneira incompleta (SOEST et al., 2019; ORBONS et al., 2024; UMWELTBUNDESAMT, 2025).

Dessa forma, os IAMs desempenham papel essencial na análise da substituição da matriz fóssil por alternativas de baixo carbono, em linha com as diretrizes do 1º GST.

[12] Os modelos IAMs, em geral, e o modelo BLUES, em específico, são retratados em maiores detalhes no Anexo 1.

Nesse contexto, a eletrificação crescente do setor energético é apontada como eixo estruturante da descarbonização (ZHANG et al., 2023; CALDERON et al., 2024). No entanto, essa eletrificação acarreta transformações profundas na base material dos sistemas energéticos. Isso ocorre, pois tecnologias de baixo carbono tendem a ser mais intensivas em minerais do que os sistemas baseados em combustíveis fósseis (DE KONING et al., 2017; SHI et al., 2025). Com efeito, tecnologias de baixo carbono como turbinas eólicas, módulos fotovoltaicos, baterias eletroquímicas, pilhas a combustível e motores elétricos demandam quantidades significativas de cobre, lítio, níquel, cobalto, grafite e elementos de terras raras e de outros materiais considerados críticos (IEA, 2021). Portanto, a transição energética é, simultaneamente, uma transição material.

Esses materiais[13] são classificados como críticos não apenas por sua relevância funcional, mas também por sua exposição a riscos nas cadeias de suprimento. A distribuição desigual de reservas, a concentração geográfica da produção, o companheirismo mineral, os mercados relativamente pequenos e as limitações técnicas à substituição e reciclagem tornam esses materiais suscetíveis a instabilidades políticas, restrições comerciais e choques externos, compondo, assim, um quadro de vulnerabilidade crescente (IRENA, 2023; IRENA E NUPI, 2024). À medida que a eletrificação se acelera e a implantação de tecnologias limpas se amplia, intensifica-se a pressão sobre essas cadeias globais de suprimento (IEA, 2021).

É nesse cenário de crescente intensificação material da descarbonização que se insere a modelagem da NDC brasileira. A partir do BLUES, foram construídas trajetórias de emissões compatíveis com o cumprimento das metas nacionais para 2025, 2030 e 2050, priorizando a maior custo-efetividade para a economia como um todo. Essas trajetórias serviram como insumo científico tanto para orientar os tomadores de decisão, quanto para informar as possíveis rotas para a neutralidade climática de longo prazo, além de fundamentar a definição da meta intermediária de emissões para 2035.

[13] Historicamente, a literatura acadêmica e institucional empregou diferentes denominações para os materiais críticos, variando entre “material”, “mineral”, “metal” e “elementos” críticos. Muitas vezes, esses termos foram aplicados de forma intercambiável, embora não sejam sinônimos. De maneira geral, preferiu-se neste trabalho por utilizar predominantemente o termo “materiais” por este ser mais abrangente ou até “elementos”, pois, em última análise, o objeto de estudo foca no teor elementar dos materiais críticos em tecnologias de baixo carbono. Ainda assim, o uso dessas variações pode ser observado ao longo do trabalho conforme o contexto específico em discussão.

A segunda NDC detalha planos setoriais que foram traçados com auxílio do modelo BLUES. No setor agropecuário, a estratégia brasileira baseia-se na expansão sustentável da produção, conciliando segurança alimentar, segurança energética e mitigação de emissões. Essa abordagem apoia-se, sobretudo, na conversão de pastagens degradadas em áreas produtivas e na intensificação sustentável dos sistemas agropecuários, com destaque para sistemas integrados como a integração lavoura-pecuária e lavoura-pecuária-floresta por meio de instrumentos como o Plano ABC+.

No setor de uso da terra e florestas, o Brasil implementará esforços coordenados e contínuos para suprimir o desmatamento ilegal e incentivar a preservação da vegetação nativa. Entre instrumentos relevantes para a implementação de ações relacionadas ao uso da terra e florestas estão os Planos para Prevenção e Controle do Desmatamento nos Biomas – inclusive Amazônia Legal (PPCDAm) e Cerrado (PPCerrado) – e o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg).

No setor de transportes, a mitigação das emissões será promovida de forma articulada com o setor de energia, principalmente por meio da substituição de combustíveis fósseis por eletricidade e biocombustíveis. A eletrificação tende a se intensificar, exigindo avanços tecnológicos, adaptação de rotas e expansão da infraestrutura de recarga. Além disso, a NDC antecipa a incorporação do hidrogênio como alternativa energética a partir de 2035. Medidas complementares, como a melhoria da infraestrutura logística e a adoção de práticas de condução mais eficientes, contribuem para reduções imediatas no consumo de combustíveis.

Por fim, importa citar a única menção aos materiais estratégicos[14] na segunda NDC brasileira. Eles fazem parte de um dos sete temas estratégicos para o país para a destinação de recursos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I), conforme orienta a resolução do conselho nacional de política energética (CNPE) nº 2/2021. Tal menção está profundamente conectada com o objetivo nacional de mitigação n° 10: "Transformar as vantagens comparativas brasileiras em vantagens competitivas, tornando o país um provedor de bens, serviços e soluções climáticas para um mundo em transição para modelos de desenvolvimento de baixo carbono".

[14] Como será visto na Seção 3, materiais estratégicos diferem-se conceitualmente de materiais críticos. O Brasil, no entanto, não possui uma lista de materiais críticos, apenas estratégicos.

Antes de poder atuar como provedor de bens e serviços de baixo carbono para o mundo a partir dos materiais críticos, cabe ao Brasil primeiro compreender se ele será capaz de suprir a demanda destes bens para si mesmo, ainda que parcialmente. Essa lacuna não se restringe ao documento brasileiro. Não obstante a suas atribuições e potencial analítico, os IAMs ainda enfrentam limitações relevantes, dentre elas, a representação inadequada da demanda por materiais críticos (BLEISCHWITZ et al., 2018). A factibilidade dos caminhos ótimos de mitigação pode ser comprometida quando restrições físicas ou temporais associadas à disponibilidade destes materiais não são explicitamente consideradas. Nesse sentido, a dimensão material constitui um dos principais pontos cegos dos IAMs, sobretudo em cenários de rápida eletrificação e expansão de tecnologias de baixo carbono, como proposto na segunda NDC brasileira.

Nesse sentido, a NDC brasileira ignora a dimensão material da transição energética, e os próprios IAMs que fundamentam sua formulação reproduzem essa lacuna. Diante desse contexto, o presente trabalho busca responder à seguinte questão: quais são os requisitos de materiais críticos associados ao cumprimento da meta climática brasileira?

Para esse fim, realiza-se o pós-processamento dos resultados do modelo nacional de Avaliação Integrada BLUES, a partir de um cenário compatível com a segunda NDC brasileira, submetida em 2024. Esse procedimento consiste em estimar a demanda por materiais críticos incorporados à formação de bens de capital necessários à expansão e transformação do sistema energético brasileiro rumo à neutralidade climática até 2050. Nesse sentido, “materializar” a NDC significa traduzir metas agregadas de emissões em quantidades físicas de insumos críticos, explicitando a dimensão material da transição energética.

Dessa forma, o presente trabalho possui grande valor, ao estimar a demanda de materiais críticos para que alcance seus objetivos climáticos apresentados na nova NDC. Este estudo aborda essa limitação ao examinar a dimensão material associada às trajetórias de transição energética brasileira a partir dos resultados do BLUES, ainda que de forma parcial, pois a avaliação da capacidade de atendimento dessa demanda ao longo do tempo – embora fundamental – extrapola o escopo desta pesquisa.

A fim de lidar com as incertezas associadas à dinâmica tecnológica de longo prazo e às possíveis substituições entre subtecnologias[15], foram construídos três subcenários contrastantes. O cenário Business as Usual (BAU) mantém as tendências tecnológicas atuais, assumindo evolução incremental. O cenário Disrupção Tecnológica, por sua vez, considera avanços tecnológicos acelerados e rápida difusão de inovações com melhor desempenho técnico. Já o cenário Restrição Material incorpora explicitamente a criticidade dos insumos, condicionando a seleção e expansão das subtecnologias à sua dependência de materiais estratégicos.

Assim, a dissertação está organizada em seis capítulos, estruturados em duas partes. A primeira reúne a contextualização e a revisão conceitual. Além desta Introdução, o Capítulo 2 examina a evolução do conceito de materiais críticos, discute suas principais dimensões analíticas e apresenta estratégias de substituição material voltadas à mitigação de riscos nas cadeias de suprimento. O Capítulo 3, por sua vez, revisa os conversores energéticos associados a esses materiais, analisando as vantagens, limitações e os compromissos tecnoeconômicos de suas subtecnologias.

A segunda parte dedica-se à aplicação metodológica e à análise dos resultados. O Capítulo 4 descreve a metodologia desenvolvida, apresenta o cenário implementado no modelo BLUES e detalha a construção dos cenários de penetração tecnológica, bem como a evolução da participação das subtecnologias selecionadas. O Capítulo 5 expõe os principais resultados do BLUES para o cumprimento da NDC brasileira, bem como as estimativas de demanda por materiais críticos associadas às escolhas subtecnológicas em cada cenário, desenvolvendo sua respectiva discussão analítica. Por fim, o Capítulo 6 sintetiza as conclusões do estudo, destacando suas limitações e apontando possíveis desdobramentos para pesquisas futuras.

[15] O termo subtecnologia designa variantes específicas de uma tecnologia mais abrangente. Essas variantes compartilham finalidades, princípios de funcionamento ou características construtivas semelhantes, mas distinguem-se em aspectos técnicos ou operacionais específicos e, sobretudo, no que se refere a seus requerimentos materiais. Será possível compreender melhor o uso deste termo no trabalho a partir dos exemplos dados no capítulo 4.

2. Materiais Críticos e a Transição Energética

2.1. Preâmbulo

Embora o debate contemporâneo sobre materiais críticos e estratégicos esteja fortemente associado à transição energética e às tecnologias de baixo carbono, a origem do conceito remonta ao início do século XX, em um contexto profundamente marcado por preocupações industriais e de defesa nacional. Sua formulação inicial ocorreu nos Estados Unidos, durante a Primeira Guerra Mundial, refletindo tanto a centralidade do país no sistema industrial emergente quanto a predominância de registros históricos produzidos nesse contexto nacional (BRITT E CZARNOTA, 2024). Em função desse contexto histórico e das limitações linguísticas do autor, este trabalho reconhece a predominância de uma narrativa de origem norte-americana na reconstrução do desenvolvimento do conceito.

Como será discutido adiante, a definição de materiais críticos mudou ao longo da história. Essas mudanças envolveram tanto a caracterização da criticidade, quanto o próprio objeto de análise. Assim, enquanto a criticidade variou de acordo com quem a define, com o contexto histórico da época e do escopo considerado, o objeto assumiu diferentes formas na literatura acadêmica e institucional, variando entre "material", "mineral", "metal" e "elementos" críticos. Como falado na Introdução, esse uso intercambiável é conceitualmente impreciso.

Dessa forma, durante a revisão bibliográfica, buscou-se preservar os termos utilizados nos textos bibliográficos para manter seu sentido fiel às suas referências. No entanto, de maneira mais geral e no restante do trabalho, optou-se por utilizar predominantemente o termo "materiais" por este ser mais abrangente ou até "elementos", pois, em última análise, o objeto de estudo deste trabalho foca no teor elementar dos materiais críticos em tecnologias de baixo carbono. Com efeito, o termo materiais, assim, resolve e comporta contradições de outras terminologias, como a inclusão de materiais orgânicos como borracha e petróleo[16], de gases nobres, como hélio, ou até conjuntos de elementos químicos, como os elementos de terras raras, em listas de "minerais" críticos.

[16] O Petróleo, apesar de ser classificado como um recurso mineral, não é um mineral em si, mas sim uma mistura de compostos orgânicos.

Além disso, cabe destacar que, embora o tema dos materiais críticos possua um histórico que se estende por mais de um século, sua abordagem mais sistemática, acadêmica e conceitual ganhou novos contornos, consolidando-se sobretudo a partir de 2008 (GLÖSER et al, 2015; SCHICHO e ESPINOZA, 2024). Ainda assim, a trajetória dos materiais críticos está intrinsecamente associada à própria evolução da indústria mineral e ao contexto geopolítico de cada época. Por essa razão, o panorama histórico aqui apresentado percorre marcos relevantes dessa indústria, com o objetivo de contextualizar tanto a importância atribuída aos materiais críticos em diferentes períodos, quanto o seu ressurgimento no debate contemporâneo no século XXI.

2.2. Histórico

2.2.1. Origem e institucionalização do conceito (1917 -1945)

A relevância geopolítica dos minerais antecede sua formalização como "críticos" ou "estratégicos". Ao longo da história, recursos minerais desempenharam papel central na formação de impérios, na colonização de territórios e na deflagração de conflitos armados, funcionando tanto como motivação econômica, quanto como instrumento de poder (HUMPHREYS, 2013; HUMPHREYS, 2022; BRITT E CZARNOTA, 2024). Ainda assim, foi apenas no início do século XX que esses materiais passaram a ser sistematicamente classificados sob essas categorias.

Com a eclosão da Primeira Guerra Mundial, a busca por autossuficiência mineral tornou-se uma prioridade para as nações industrializadas, impulsionada pelo reconhecimento de que, nos conflitos modernos, a capacidade industrial e o acesso contínuo a insumos essenciais eram mais determinantes do que fatores tradicionais como liderança ou moral das tropas (KNORR, 1956). Embora essa percepção tenha emergido inicialmente em solo europeu (HAGLUND, 1984), os efeitos da guerra rapidamente se disseminaram, devido a alterações nas condições do comércio internacional pela interferência no suprimento de matérias-primas e ao aumento da demanda por esses insumos (SMITH, 1917).

Mesmo países considerados "mineralmente independentes", como os Estados Unidos, enfrentaram escassez de materiais específicos em razão da instabilidade do

comércio internacional e das exigências do esforço da guerra[17] (SMITH, 1917; LEITH, 1917; ROUSH, 1934; HAGLUND, 1984). Esses elementos evidenciaram a incapacidade norte-americana de produzir determinados bens domesticamente, explicitando também dependências externas em um mercado internacional interdependente e de poucos atores (LEITH, 1917). Nesse contexto, foi estabelecida a primeira lista não-oficial de minerais críticos e estratégicos, atribuída a Charles Kenneth Leith, conselheiro da comissão de Indústrias de Guerra, em 1917 (HAGLUND, 1984, SCHULZ ET AL., 2017, BRITT E CZARNOTA, 2024). Apesar de indissociável da sua conjuntura global bélica, a lista apresentava caráter predominantemente industrial e indicava o grau de deficiência da produção doméstica de cada mineral listado[18]. Com efeito, os materiais cuja produção doméstica era insuficiente demandavam estratégias de guerra para manter seu suprimento e, portanto, seriam denominados como estratégicos[19] (HAGLUND, 1984).

Como desdobramento institucional desse aprendizado, a reorganização do Departamento de Guerra norte-americano em 1919 levou à criação de uma unidade dedicada ao planejamento da mobilização industrial. A primeira lista oficial, veio então em 1921, da Divisão de Suprimentos do Estado-Maior do Departamento de Guerra ("War Department General Staff"), cuja função era de preparar a logística nos planos para defesa nacional e mobilização em tempos de guerra (SCHULZ et al., 2017). Essa lista ficou conhecida como "Harbord List", contendo 28 materiais que apresentaram gargalos de

[17] Ainda que barreiras tarifárias, controles comerciais e monopólios existisse antes da guerra, a escassez de navios e os distúrbios financeiros causados pela guerra são apontados como principais motivos para alterações na distribuição e no alcance do comércio mundial (LEITH, 1917).

[18] Apesar de a literatura apontar essa como a primeira lista não oficial de materiais críticos e estratégicos, não há menção a estes termos. O documento consiste em uma avaliação qualitativa da posição dos Estados Unidos em relação às commodities minerais, organizando-as em três grupos principais: minerais cujo excedente é exportado pelo país; minerais cuja demanda doméstica é atendida por importações; e minerais cuja demanda depende de importações, mas que poderiam ser produzidos internamente caso desejado. No caso dos minerais exportados, há ainda uma subdivisão em três categorias, distinguindo-se aqueles cuja exportação norte-americana domina o mercado mundial, aqueles para os quais constitui um fator relevante, embora não dominante, e aqueles cuja exportação é pouco significativa no comércio internacional; já entre os minerais importados, diferenciam-se os que dependem integralmente de importações e aqueles, cuja demanda é apenas parcialmente suprida por produção doméstica.

[19] LEITH (1917) destaca diversos acordos internacionais para a alocação de minerais para diferentes nações. Dentre as estratégias adotadas, destacam-se o racionamento do nitrato chileno – essencial tanto para fertilizantes, quanto para a produção de explosivos –, e de materiais como estanho, tungstênio e platina. Outro exemplo das estratégias adotadas a época foi o acordo firmando entre Estados Unidos, França e Inglaterra, no qual os Estados Unidos se comprometiam a adquirir minério de ferro e molibdênio da Escandinávia com o objetivo explícito de restringir acesso alemão a estes materiais.

suprimento durante a guerra (HUDDLE, 1976). No entanto, essa lista não classificava os materiais listados entre críticos e estratégicos, designando apenas se eles eram demandados por uma ou mais divisões das forças armadas (ROUSH, 1938). Essa denominação surgiria apenas em 1922 (ROUSH, 1938; BRITT CZARNOTA, 2024).

Entre 1917 e 1939 foram elaboradas ao menos 15 listas entre oficiais e não oficiais, as quais categorizavam minerais e materiais como estratégicos, críticos, essenciais e deficientes. As 9 primeiras listas não diferenciavam os minerais entre críticos e estratégicos, limitando o progresso de seu estudo e relevância. Essa separação veio partir da 6ª lista oficial (10ª lista cronológica), em 1932 (ROUSH. 1938; BRITT E CZARNOTA, 2024). Enquanto a alcunha de estratégicos era designada aos minerais estratégicos do ponto de vista industrial ou militar considerados definitivamente escassos, os materiais críticos representavam minerais com potencial de escassez devido ao aumento de demanda, mas que com medidas de controle de consumo ou estímulo à produção poderiam manter sua base de oferta suficiente (ROUSH, 1934). Os materiais essenciais seriam os de grande valor para a defesa nacional, mas que não apresentavam problemas de suprimento (NAS, 2008). Apesar destes esforços iniciais para categorizar diferentes materiais, a classificação dos materiais variava significativamente de acordo com os indivíduos ou grupos que produziam as listas (SCHULZ et al., 2017), denotando falta de metodologia e de definições claras.

HUDDLE (1976), contudo, atribui as variações dos materiais classificados ao rápido avanço tecnológico ocorrido no período entre guerras. Segundo o autor, as mudanças sucessivas nas listas de materiais devem-se a demanda por novos materiais, especialmente como aditivos para ligas metálicas especializadas, a novas descobertas geológicas e as fortes oscilações de demanda após a Grande Depressão. Esses fatores evidenciam que, desde seus primórdios, essas classificações possuem um caráter intrinsecamente dinâmico.

Às vésperas da Segunda Guerra Mundial, a política de materiais foi formalmente institucionalizada nos Estados Unidos com a aprovação do Strategic and Critical Materials Stock Piling Act (EUA, 1939). A legislação consagrou a formação de estoques como instrumento central de segurança nacional, definindo de forma ampla os materiais necessários à defesa, à indústria e à população civil em situações de emergência, cuja produção doméstica fosse insuficiente.

2.2.2. Pós-guerras mundiais (1945 – 1970)

No pós-guerra imediato, a consolidação da liderança geopolítica dos Estados Unidos e a liberalização do comércio e dos investimentos internacionais favoreceram a expansão de empresas multinacionais norte-americanas e europeias na mineração de países recém-independentes. Essa atuação foi amplamente percebida como a reprodução de padrões coloniais sob novas formas institucionais, caracterizadas pelo controle estrangeiro de setores estratégicos, pela limitada agregação de valor local, pela remessa de rendas ao exterior e pela manutenção de relações assimétricas de dependência econômica. Diante disso, ganharam força visões nacionalistas que questionavam a suficiência da independência política e defendiam a apropriação estatal dos setores extrativos como meio de assegurar maior autonomia econômica e direcionar a renda mineral a objetivos de desenvolvimento nacional[20] (HUMPHREY, 2013).

Domesticamente, a preocupação americana com o suprimento mineral manteve-se fortemente associada à defesa. A criação de grandes estoques estratégicos concentrou-se em matérias-primas industriais básicas não abundantes nos Estados Unidos, como bauxita, manganês, cromo, níquel, estanho e zinco (HUMPHREYS, 2014). O aumento da demanda decorrente da reconstrução europeia e da Guerra da Coreia reacendeu temores de exaustão de recursos domésticos, cristalizados no Relatório "Resources of Freedom" da Comissão Paley (HUDDLE, 1976; ZOTIN, 2018) e ilustrados pela depleção de importantes minas de bauxita no Arkansas e de Ferro em Minnesota.

O relatório apontava para um cenário catastrófico de dependência externa e escassez, sugerindo que "os Estados Unidos não teriam os meios materiais para sustentar sua civilização" (LAURENT et al., 2025). Foram recomendados, entre outras medidas, a redução de barreiras comerciais domésticas e o investimento de corporações americanas no exterior para lidar com o desbalanço iminente entre produção e demanda de minerais nos EUA (ZOTIN, 2018). Além disso, dever-se-ia manter dados estatísticos robustos a respeito de oferta e demanda, preservar recursos e desenvolver novas tecnologias baseadas em substitutos.

[20] Aqui podem ser citadas as estatizações das mineradoras de estanho na Bolivia (1952) e na indonésia (1950), além da criação da Vale do Rio Doce (1942) e da CSN (1941) no Brasil.

Embora influente, o relatório teve impacto limitado no curto prazo devido ao contexto eleitoral e ao arrefecimento da Guerra da Coreia. Na década de 1950, a política de estoque de materiais críticos e estratégicos passou a ser disputada por interesses políticos e econômicos diversos, sendo utilizada também como instrumento de apoio à indústria mineral doméstica (HUDDLE, 1976; NRCb, 2008). Embora alguns segmentos da mineração tenham sido beneficiados, houve compras ineficientes e distorções de mercado, como a aquisição de minerais de baixo valor econômico a preços elevados. Além disso, o uso político do estoque levou ao estímulo indireto a produtores estrangeiros e a queda abrupta de preços após o fim das compras governamentais (HUDDLE, 1976). Essa combinação de metas de segurança e política industrial produziu, portanto, resultados ambíguos, incluindo distorções de mercado e incentivos de curto prazo pouco sustentáveis.

A partir da década de 1960, críticas crescentes aos custos, à eficácia e aos impactos de mercado das políticas de materiais críticos levaram à perda de centralidade do planejamento estatal na política mineral americana. Simultaneamente, emergiu uma nova inflexão conceitual ao associar a gestão de materiais às questões ambientais. A degradação ambiental passou a ser interpretada como consequência de fluxos materiais mal administrados, aproximando a política de materiais da política ambiental e introduzindo princípios como eficiência no uso de recursos, reciclagem e integração entre políticas de materiais, energia e meio ambiente. Esses princípios estiveram presentes no relatório da comissão nacional de política material (HUDDLE, 1976). Diferente do relatório Paley, muito voltado à segurança nacional, o novo relatório apresentava um caráter muito mais econômico, voltado para às necessidades civis da sociedade, marcando uma nova etapa da política material americana (HUDDLE, 1976; HAGLUND, 1984; ZOTIN, 2018).

2.2.3. Uma nova visão de criticidade (1970 até o fim da guerra fria)

A partir desse período, intensificou-se a diferenciação entre a perspectiva dos países consumidores e a dos países produtores. A redução das disputas territoriais e a limitação de conflitos armados de grande escala, em função do risco nuclear, deslocaram o eixo central das preocupações estratégicas para o campo econômico, que passou a assumir papel predominante (HANRIEDER, 1976). Dessa forma, para as economias

industrializadas, a noção de criticalidade passou a estar associada à securitização do acesso a insumos essenciais à estabilidade econômica e tecnológica. Para os países produtores, por sua vez, determinados minerais assumiram caráter estratégico por sua capacidade de promover desenvolvimento econômico, reduzir a pobreza, capturar renda e afirmar a soberania nacional (HUMPHREYS, 2014).

Com efeito, entre as décadas de 1960 e 1980, a intervenção estatal na mineração assumiu múltiplas formas. Países consumidores, como o Japão, criaram instituições voltadas à garantia de acesso a metais estratégicos por meio de investimentos em exploração no exterior (JOGMEC, 2025) e desenvolveram estratégias de estoque de materiais estratégicos (Reino Unido, Japão, França[21]) (HUMPHREYS, 1995; Laurent et al, 2025). Em paralelo, países produtores promoveram a nacionalização de seus setores minerais como estratégia de desenvolvimento e autodeterminação (e.g.: Chile, Republica Democratica do Congo, Zambia, Peru, Venezuela) e adotaram iniciativas protecionistas (Austrália e Canadá[22]) voltadas para aumentar o controle de setores estratégicos e aumentar o grau de industrialização (HUMPHREYS, 1995).

A década de 1970 marcou uma nova onda de preocupações com o suprimento mineral, agora menos centrada na capacidade militar e mais nos riscos de disrupção econômica. O foco deslocou-se para minerais essenciais à produção de aços especiais e superligas para a manufatura de oleodutos, construção de plantas petroquímicas e tecnologias de alta performance como turbinas de gás natural e de jatos, além de catalisadores para as indústrias automobilística e petroquímica. Ainda assim, os elementos demandados variavam de acordo os demandantes: Na lista da comunidade europeia (1974) constavam cromo, tungstênio, platina e manganês, enquanto os Estados Unidos apresentavam uma lista que incluía bauxita, cromo e platina (1975). Esse deslocamento consolidou a transição do conceito de criticalidade de um enfoque predominantemente militar para um enfoque econômico-industrial, cristalizado em reformas das políticas de estoque no final da década de 1970.

[21] Os estoques da França e do Reino Unido foram descontinuados ainda nas décadas de 1980/1990.

[22] O Canada estabeleceu o "Foreign Investment Review Act" (1974), em que empresas estrangeiras deveriam demonstrar benefícios significativos ao Canada para ganhar aprovação estatal. Em 1975, a Austrália passou lei similar ("Foreign Acquisitions and Takeovers Act").

Nota-se que muitos desses elementos estavam fortemente concentrados em regiões politicamente sensíveis, como a África Austral (MAUL, 1986; BUJIS E SIEVERS, 2011; HUMPHREYS, 2014). A disputa pela influência sobre os regimes locais e o aumento do preço de commodities devido aos choques de petróleo elevaram as preocupações acerca da segurança de suprimento destes minerais críticos. Por esse motivo, para garantir seu direito de minerar no leito oceânico de águas internacionais, os Estados Unidos se recusaram a assinar o tratado da convenção de águas internacionais das Nações Unidas ("UN Law of the Sea Convention") em 1981. Não obstante, a queda de preços ao longo da década de 1980, associada à crise financeira da época e consequente queda da demanda, reduziu as preocupações sobre o suprimento dos materiais críticos (ROBERTS, 1988; HUMPHREYS, 2013).

A década de 1980 ainda foi marcada pela forte influência britânica, sob a imagem de Margaret Thatcher, e americana, sob Ronald Reagan, em prol da abertura de mercados e do livre comércio. Não menos importante, as reformas de Deng Xiaoping na China representaram um ponto de mudança do papel chinês no comércio mundial, como seria constatado posteriormente.

2.2.4. Pós-guerra fria a 2008

Com o fim da Guerra Fria, no início da década de 1990, consolidou-se entre os países industrializados a percepção de que as políticas de suprimento mineral haviam sido essencialmente um produto daquele contexto geopolítico de um mundo dividido em blocos de influência. A abertura inter-regional expandiria os fluxos de comércio em direção a uma verdadeira globalização guiada pelo mercado (BUJIS E SIEVERS, 2011; HUMPHREYS, 2013; LAURENT ET AL, 2025). Parte disso decorre da redução de custos de transporte, além de avanços nos setores de telecomunicação e de tecnologia da Informação, que permitiram a promoção de um regime de precificação transparente, global e integrada, centralizada na bolsa de metais London Mercantile Exchange. Essa nova conjuntura contribuiu para uma menor percepção de risco de interrupções de suprimento, levando ao desmonte de políticas de estoques estratégicos e à ampla privatização do setor mineral, tanto em economias desenvolvidas, quanto em países em desenvolvimento (HUMPHREYS, 1995; BUJIS E SIEVERS, 2011).

As empresas nacionalizadas nas décadas anteriores encontravam-se amplamente endividadas e se tornavam crescentemente em um fardo ao estado[23], em face ao baixo valor das commodities à época. Concomitantemente, capturados pelo zeitgeist do neoliberalismo, instituições como o FMI e o Banco mundial condicionavam novos empréstimos à privatização de empresas de infraestrutura e de recursos naturais, além de fornecerem assistência técnica para o desenho de novas políticas públicas que levavam a abertura dos mercados (HUMPHREY, 2013; DE SA, 2019). Como desdobramento deste processo, o investimento estrangeiro direto não só reposicionou o destino geográfico da exploração, em especial para países da América Latina, como passou o controle das mineradoras a grupos de países industrializados (HUMPHREYS, 1995; BUIJS E SIEVERS, 2011; ERICSSON, 2022; ERICSSON ET AL., 2024).

Nesse novo paradigma, a mineração passou a ser tratada predominantemente como uma atividade industrial orientada pelo livre comércio internacional, enquanto as preocupações com segurança de suprimento cederam espaço às questões de sustentabilidade ambiental. Segundo HUMPHREYS (1995), os "receios sobre disponibilidade de minerais foram substituídos por receios sobre sustentabilidade", transformando a política mineral essencialmente em um desdobramento da política ambiental, em detrimento de seu papel industrial ou estratégico.

Esse movimento coincidiu com uma profunda reconfiguração da geografia global da mineração (Figura 2). Desde o início do século XX, a produção mineral deslocou-se progressivamente dos países consumidores, isto é, países industrializados da Europa, América do Norte e Japão, para economias emergentes da América Latina, África, Ásia (ERICSSON, 2022) A combinação entre globalização dos mercados, endurecimento da

[23] O elevado endividamento das empresas mineradoras nos anos finais da década de 1970 e início dos anos 1980 esteve associado, em grande medida, ao forte aumento dos preços dos minerais ao longo da década de 1970 e à percepção equivocada de que a demanda continuaria indefinidamente. Essa dinâmica foi amplificada pelas características estruturais da atividade mineral, marcada por elevados custos de capital, longos ciclos de investimento e defasagem significativa entre a decisão de investimento, a descoberta de jazidas e o início da produção. Nesse contexto, a expansão da capacidade produtiva foi financiada por meio de empréstimos contratados a taxas de juros reais reduzidas, em um ambiente de políticas monetárias expansionistas adotadas pelas principais economias como resposta aos choques da época. Contudo, as projeções otimistas de demanda não se confirmaram: o consumo de minerais desacelerou de forma abrupta, ao mesmo tempo em que o ciclo de juros reais baixos se encerrou com o controle da inflação no início da década de 1980, elevando significativamente o custo do endividamento e comprometendo a sustentabilidade financeira de muitas empresas do setor (ROBERTS, 1988).

legislação ambiental nos países industrializados e a liberalização dos regimes minerários no sul global contribuiu para a consolidação da chamada “Pollution Haven Hypothesis”, segundo a qual indústrias intensivas em poluição tendem a se deslocar para países com regimes regulatórios ambientais menos rigorosos, um processo iniciado na década de 1970 e intensificado a partir dos anos 1990 (BASHIR, 2022).

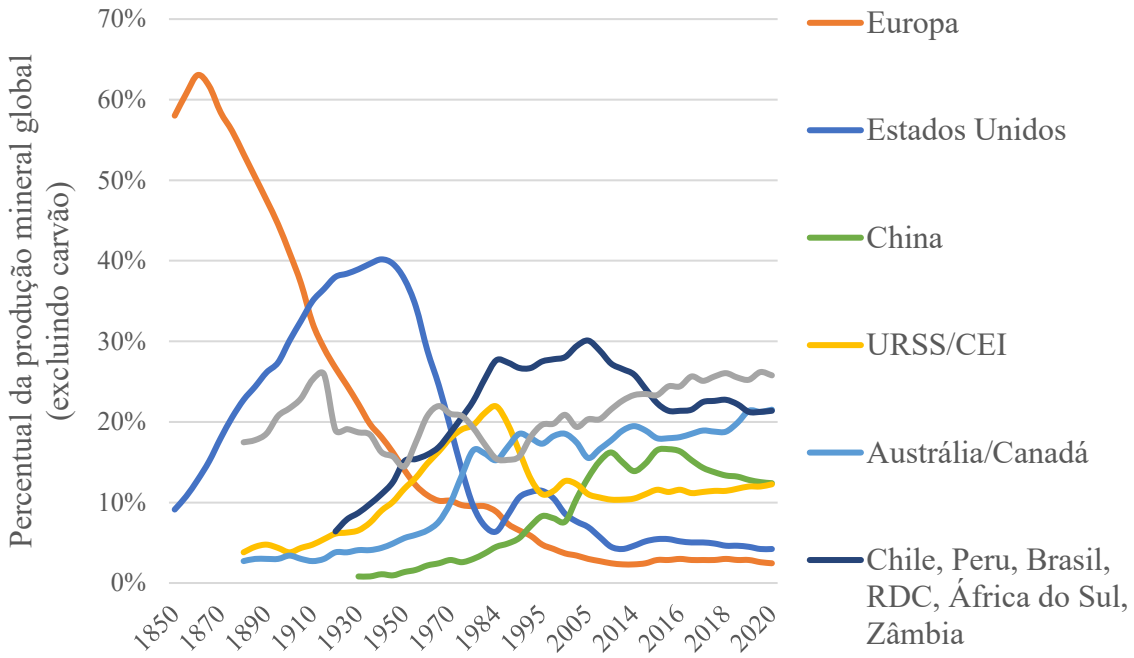


Figura 2- Posição geográfica da mineração 1850 – 2025. Nota: URSS – União das Repúblicas Socialistas Soviéticas; CEI – Comunidade dos Estados Independentes; RDC – República Democrática do Congo.

Fonte: Adaptado de Ericsson (2022)

No início do século XXI, a rápida industrialização e urbanização das economias emergentes passaram a exercer forte pressão sobre a demanda global por minerais, com destaque para o papel da China neste processo (NRC, 2008; BUIJIS E SIEVERS, 2011; HUMPHREYS, 2013; ZOTIN, 2018). Embora o país tenha inicialmente buscado atender o crescimento de sua demanda por meio da expansão da produção doméstica, consolidando-se como um dos maiores produtores minerais do mundo, os limites dessa estratégia tornaram-se evidentes diante do ritmo acelerado de sua industrialização. Para garantir a segurança de abastecimento de sua indústria, a China também aumentou sua participação em projetos internacionais por meio do investimento estrangeiro direto, o que seria intensificado após a crise financeira do Subprime.

Essa defasagem entre oferta e demanda em escala global contribuiu para o ciclo de alta das commodities minerais entre 2003 e 2008 e reacendeu preocupações

internacionais relacionadas à escassez, à elevada concentração geográfica da produção e à vulnerabilidade das cadeias globais de suprimento (NRC, 2008; ZOTIN, 2018). Com efeito, essas preocupações levaram a uma nova fase para materiais críticos e estratégicos.

2.2.5. Nova fase dos materiais críticos (2008 até os dias atuais)

A conjuntura anteriormente descrita levou à elaboração de dois estudos de referência sobre materiais críticos pelo Conselho Nacional de Pesquisa dos Estados Unidos (National Research Council). O primeiro, de caráter estratégico-militar, concentrou-se na segurança da cadeia de suprimentos e na adequação dos estoques destinados à defesa (NRCb, 2008). O segundo, de natureza econômica, teve como objetivo identificar e classificar materiais críticos (NRC, 2008), sendo pioneiro ao tratar a criticidade de forma explícita para além do escopo estritamente militar-estratégico (SCHICHO E ESPINOZA, 2024). Nele, a classificação dos elementos críticos baseava-se em uma matriz bidimensional composta pelo risco de oferta e pelo impacto econômico associado a eventuais restrições de suprimento.

Embora esses trabalhos tenham estabelecido um marco conceitual relevante, foi a crise dos elementos de terras raras, em 2010, que atuou como principal catalisador para a intensificação do debate e para a retomada dos materiais críticos como tema de primeira importância (FRENZEL ET AL., 2017; SCHRIJVERS ET AL., 2020, SCHICHO E ESPINOZA, 2024). Esse episódio ampliou significativamente a percepção de vulnerabilidade quanto ao acesso a esses insumos. Como consequência, diversas listas de criticidade passaram a ser elaboradas, com escopos distintos – militar, econômico, energético, industrial, entre outros. Considerando os objetivos deste trabalho, após uma visão geral do status corrente deste campo de estudo, a discussão concentrar-se-á nas listas e abordagens voltadas à transição energética.

Desde o início da década de 2010, os estudos de criticidade passaram a ser conduzidos por uma multiplicidade de atores e em diferentes escalas – nacional (NRC, 2008; EU, 2023; MUDD, 2024), setorial (DOE, 2011; DOE, 2023), acadêmica (GRAEDEL ET AL., 2012; GRAEDEL ET AL., 2015), corporativa (DUCLOS ET AL., 2010; LAPKO ET AL., 2016) e até tecnológica (HABIB E WENZEL, 2016, 2015; HELBIG ET AL., 2018). Como consequência, proliferaram diversas metodologias de avaliação da criticidade destinadas a identificar materiais estratégicos e subsidiar processos decisórios.

Do ponto de vista conceitual, GLÖSER et al. (2015) destacam que os estudos de criticidade material podem ser entendidos como uma adaptação das abordagens clássicas de análise de risco, enquanto FRENZEL et al. (2020) sintetizam a criticidade como uma medida do risco associado a um determinado uso de um material, para um consumidor específico, dentro de um horizonte temporal definido. Dessa forma, a criticidade não constitui uma propriedade intrínseca do material, mas resulta da interação entre padrões de demanda, características da oferta, contexto tecnológico, recorte geográfico, horizonte temporal e condições geopolíticas, sendo, portanto, inerentemente dinâmica e dependente do sistema analisado e dos atores que o analisam. Essas características tornam as análises de criticidade uma ciência inexata, pois dependem de projeções de cenários a respeito da evolução da demanda, dos mercados ou da disponibilidade física de matérias-primas (SCHICHO E ESPINOZA, 2024). GRAEDEL et al. (2012) destacam que a criticalidade não deve ser entendida de forma binária, mas sim como um atributo contínuo e expresso em diferentes graus.

A ausência de um arcabouço teórico padronizado para a mensuração da criticidade e a elevada heterogeneidade dessas análises não impediu a formação de características gerais comuns. Nesse sentido, a maior parte dos estudos converge para estruturas bidimensionais que combinam, ainda que com variações metodológicas, uma dimensão associada à importância econômica, estratégica ou tecnológica do material e outra relacionada ao risco de restrições de sua oferta (SCHRIJVERS et al., 2020) – também podem ser adotadas estruturas tridimensionais, quando incorporada a questão ambiental na forma de aspectos como reciclabilidade, impacto ambiental da mineração, e toxicidade de determinado material (GRAEDEL et al, 2012; YAN et al., 2021)

À medida que o enfoque das análises de criticidade nacional se deslocou de preocupações predominantemente militares para considerações econômicas, as abordagens passaram a refletir de forma mais clara o papel de cada país na indústria mineral global, em especial sua posição como importador ou exportador. Economias industrializadas como Estados Unidos, Japão, União Europeia e China buscam apropriar-se dos avanços tecnológicos e concentrar-se nas etapas de maior valor agregado das cadeias produtivas, o que as leva a priorizar a segurança do fornecimento de matérias-primas (SCHICHO E ESPINOZA, 2024). Nesse contexto, é relevante a constatação da importância atribuída por estes países a tecnologias de baixo carbono, cujo aumento de demanda tende a transformar a importância destes mercados. Em geral, suas avaliações

de criticidade tendem a seguir princípios metodológicos semelhantes, tanto por terem participado da formulação desses referenciais, quanto por terem sido fortemente influenciadas por eles. Além disso, em razão do caráter dinâmico dessas análises, suas listas de materiais críticos são revisadas de forma periódica.

Em contraste, países predominantemente produtores, como Austrália, Brasil, Canadá, África do Sul, Indonésia e Rússia, buscam sobretudo capitalizar o crescimento da demanda global, expandindo sua produção, mais do que mitigar riscos de interrupções no suprimento (SCHICHO E ESPINOZA, 2024). Como consequência, suas listas nacionais de materiais críticos ou estratégicos frequentemente carecem de metodologias claramente definidas ou transparentes, como nos casos de Brasil, Rússia, África do Sul e Indonésia, ou se baseiam em abordagens mais qualitativas, como meta-estudos (Austrália) e julgamentos de especialistas (Canadá). A China ocupa uma posição singular, atuando simultaneamente como grande importadora e exportadora. Apesar de não divulgar oficialmente uma lista de materiais críticos ou estratégicos, seu uso para guiar políticas nacionais é amplamente reconhecido e provavelmente articulado aos seus planos quinquenais de desenvolvimento.

2.2.6. Criticalidade e a transição energética

A relação entre materiais críticos e a transição energética viria de maneira mais explicita em 2009, a partir de um estudo do instituto alemão de ecologia aplicada (Öko-Institut e.V), em um momento que as tecnologias de baixo carbono ainda eram percebidas como tecnologias do futuro (UNEP, 2009). Nesse trabalho, a criticidade dos elementos foi avaliada com base em três pilares: demanda futura, risco de oferta e potencial de reciclabilidade. O Departamento de Energia americano (DOE) reforçou essa conexão ao lançar o documento "Critical Materials Strategy". Nele, a dimensão do impacto econômico do estudo do NRC foi substituída pela importância para tecnologias de baixo carbono ("clean energy") (DOE, 2011).

As preocupações com a disponibilidade de materiais críticos intensificaram-se à medida que as tecnologias de baixo carbono ganharam escala e que a urgência climática passou a sustentar projeções de consumo sem precedentes dessas tecnologias. Além da alta demanda projetada, seu risco é agravado pelo fato de tais tecnologias dependerem, em grande medida, de materiais com características que ampliam sua vulnerabilidade. Como abordado com mais detalhes no capítulo 5, esses materiais apresentam mercados

relativamente pequeno e opacos, são frequentemente produzidos como subprodutos, além de possuírem elevada concentração geográfica de produção e baixa substitutibilidade.

Nesse sentido, o IPCC reconhece que esses materiais podem se tornar gargalos relevantes para estratégias de mitigação do aquecimento global e para o cumprimento do Acordo de Paris (IPCC, 2014; IPCC, 2022), enquanto a IRENA ressalta que fragilidades nas cadeias de suprimento têm o potencial de retardar a transição energética (IRENA e NUPI, 2024). Como resultado, mais de 35 listas de materiais críticos voltadas especificamente à transição energética e às tecnologias de baixo carbono foram elaboradas por diferentes atores, incluindo a academia, organizações internacionais, instituições não governamentais e governos (IRENA e NUPI, 2024).

Assim, no contexto da transição energética, as dimensões incorporadas para a matriz de criticidade são a relevância dos materiais para tecnologias de baixo carbono baseada em projeções de demanda futura, e o risco de oferta, capturado por indicadores como a concentração geográfica da produção, companheirismo mineral, substitutibilidade e, no caso de análises nacionais, a dependência de importações, além da estabilidade político-institucional e suas relações com os países produtores. (DOE, 2011; MOSS, 2013; IEA, 2021; DOE, 2023; IRENA e NUPI, 2024).

2.3. Sobre a natureza dos materiais críticos

2.3.1. Abundância elementar – Raridade Física vs. Escassez

Recursos naturais podem ser classificados segundo a capacidade de recomposição desses, sendo considerados renováveis quando seus ciclos de regeneração ocorrem em escalas de tempo compatíveis com o uso humano, ou exauríveis (não renováveis) quando a taxa de reposição é muito inferior à de consumo (VALERO et al., 2021). Recursos minerais enquadram-se nessa última categoria, uma vez que a formação desses ocorre ao longo de eras geológicas (RIDLEY, 2013; VALERO et al., 2021; CHARLES, 2023). Dessa definição, decorre um aspecto fundamental: recursos não renováveis são finitos, cujo uso implica, inevitavelmente, em depleção ao longo do tempo. Esse fato suscita

questões fundamentais para sua análise econômica, como a quantidade efetivamente disponível[24] e o ritmo ótimo de sua exploração[25].

Naturalmente, a disponibilidade dos recursos minerais está relacionada à raridade física desses, isto é, à abundância e à distribuição dos elementos químicos na crosta terrestre. Esses tópicos são alvos de interesse ao menos desde o século XIX, quando as primeiras estimativas sobre abundância foram realizadas na Alemanha e uma lista com diferentes tipos de minerais e seus respectivos elementos químicos foi desenvolvida na França (FLEISCHER, 1954). No entanto, estimativas mais significativas foram possíveis a partir da criação do serviço geológico americana ("United States Geological Survey – USGS") e de avanços em química inorgânica e geoquímica (FLEISCHER, 1954; CHARLES et al., 2023). A abundância, representada na forma de concentração crustal na Figura 3, pode também ser compreendida como raridade física.

[24] Há diferentes métodos analíticos para a quantificação dos recursos naturais. Embora tenham sido originalmente desenvolvidas para o petróleo, essas técnicas são também aplicadas para os recursos minerais. Um dos principais objetivos desta análise é definir o último recurso recuperável (URR). Entre os métodos mais utilizados destacam-se a razão reservas-produção (R/P) e os modelos de pico de Hubbert. A razão R/P oferece uma estimativa simples do tempo de sustentação da produção a partir das reservas conhecidas, mas trata-se de um indicador essencialmente estático, apesar do contexto altamente dinâmico, como será visto ao longo deste capítulo. Já os modelos de Hubbert incorporam a dinâmica da produção ao longo do tempo, assumindo que a extração de recursos finitos segue curvas em forma de sino, com um pico associado ao esgotamento das porções mais acessíveis e de maior qualidade. Embora mais sofisticados, esses modelos também dependem criticamente das estimativas de recursos e reservas, que são economicamente condicionadas e historicamente mutáveis. A fim de capturar essas características para o contexto mineral, foi incorporado o conceito de último teor de minério mínimo ("ultimate cut-off grade"), de maneira a contabilizar avanços técnicos e mudanças econômicas (TESELETSO E ADACHI, 2021; WELLMER ET AL., 2023). Para maiores detalhes a respeito dos diferentes métodos analíticos, ver SARAIVA (2013), CALVO et al. (2017), TILTON, (2018), TESELETSO E ADACHI (2023); WELLMER et al. (2023).

[25] A formulação clássica a esse respeito é atribuída a Hotelling, que introduziu explicitamente a dimensão intertemporal na análise da exploração de recursos finitos, buscando determinar o ritmo economicamente ótimo de extração. A regra de Hotelling estabelece que, em equilíbrio, o valor marginal do recurso no subsolo deve crescer à taxa de desconto, refletindo o custo de oportunidade de adiar a extração. Apesar de sua relevância teórica, sua aplicação prática tem sido amplamente questionada, sobretudo por se apoiar em hipóteses restritivas - como competição perfeita e custos de extração constantes e a coincidência entre esgotamento da reserva e ausência da demanda – que raramente se verificam na realidade, como discutido ao longo do capítulo. Para maiores detalhes, ver SARAIVA (2013), CUNHA e MISSEMER (2020), COTRINA-TEATINO E MARQUINA-ARAUJO (2024) e NAPO et al. (2025).

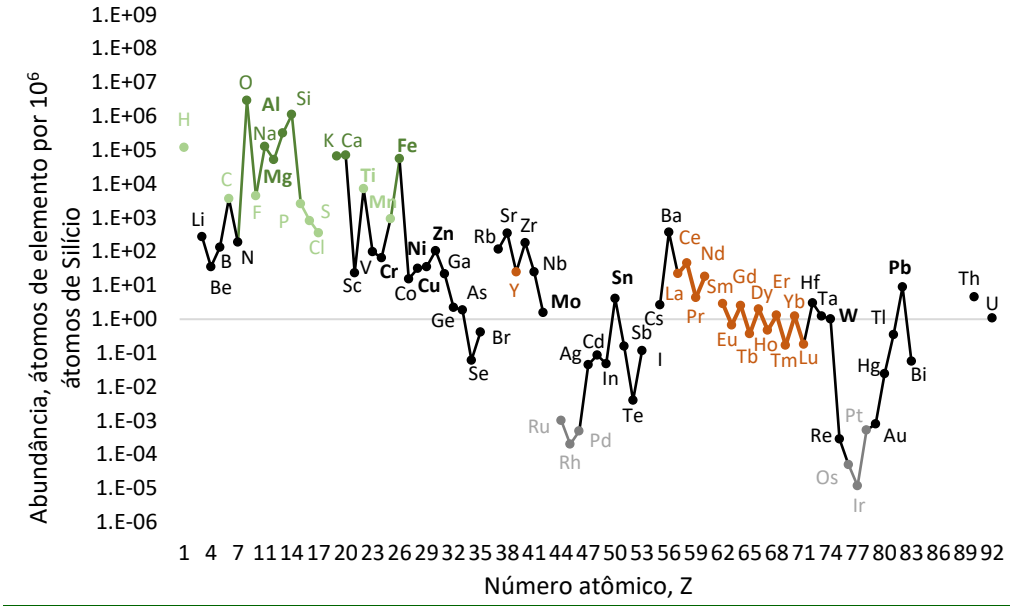


Figura 3 - Abundância relativa dos elementos químicos na crosta terrestre superior em função do número atômico.
Notas: Verde escuro - Elementos formadores de rocha primários ("Major elements"); Verde Claro: Elementos formadores de rocha secundários ("Minor Elements"). Castanho: Elementos de Terras Raras. Cinza: Metais do Grupo Platina

Fonte: Adaptado de HAXEL et al. (2002)

Contudo, é fundamental diferenciar raridade física de escassez, pois a classificação de recursos não depende exclusivamente das quantidades existentes na crosta terrestre. A raridade física diz respeito à abundância relativa de um determinado elemento em uma porção específica do planeta, sendo resultado de processos naturais independentes da ação humana (BROOKS, 1965, SCHULZ et al., 2017). Já a escassez possui natureza econômica e é definida pelo custo de acesso ao recurso em condições específicas de tempo, localização, tecnologia disponível e estruturas de mercado (SCHULZ et al., 2017; CHARLES et al., 2023). Dessa forma, enquanto a raridade é uma característica geológica intrínseca, a escassez reflete, sobretudo, a interação entre fatores econômicos, institucionais e tecnológicos, frequentemente condicionados por decisões humanas.

Essa distinção é crucial para compreender por que elementos com abundâncias crustais semelhantes podem apresentar níveis de escassez muito distintos. Para ilustrar essa relação, SCHULZ et al. (2017) comparam cobalto e escândio – embora ambos sejam relativamente raros na crosta, seus preços de mercado diferem em ordens de magnitude. Em 2012, o cobalto apresentava um preço comparativamente baixo, o que o tornava raro,

porém não escasso, enquanto o escândio, com preço elevado, era simultaneamente raro e escasso (SCHULZ et al., 2017).

Assim, SCHULTZ et al. (2017) elencam três fatores principais que explicam por que um elemento pode se tornar escasso. O primeiro é a própria raridade física, que pode limitar a ocorrência de concentrações economicamente relevantes. O segundo está relacionado à concentração mínima acima da abundância crustal média necessária para formar um depósito mineral economicamente explorável (FLEISCHER, 1954; SCHULZ et al., 2017). Essa concentração varia amplamente entre elementos e depende de características como extensão e profundidade do depósito, condições geológicas, granulometria do minério, acessibilidade e presença de outros elementos (coprodutos ou subprodutos) (FLEISCHER 1954, ALONSO et al., 2007; SCHULZ et al, 2017). Por fim, o terceiro fator determinante da escassez é a disponibilidade tecnológica para mineração e processamento. A ausência de tecnologias adequadas pode inviabilizar sua transformação em um bem economicamente utilizável.

2.3.2. Recursos naturais vs. reservas

Esses fatores geológicos e tecnológicos estão inscritos nas classificações formais de recursos e reservas, incialmente sistematizadas pelo United States Geological Survey (USGS) por meio do chamado diagrama de McKelvey (Figura 4). Nesse arcabouço, busca-se classificar recursos de acordo com o grau de certeza da existência do material e a viabilidade econômica de recuperá-lo (MCKELVEY, 1972). Dessa forma, o sistema considera tanto a parcela do recurso economicamente viável e identificado (reservas), quanto a parcela identificada, mas economicamente inviável, além da porção ainda não descoberta.

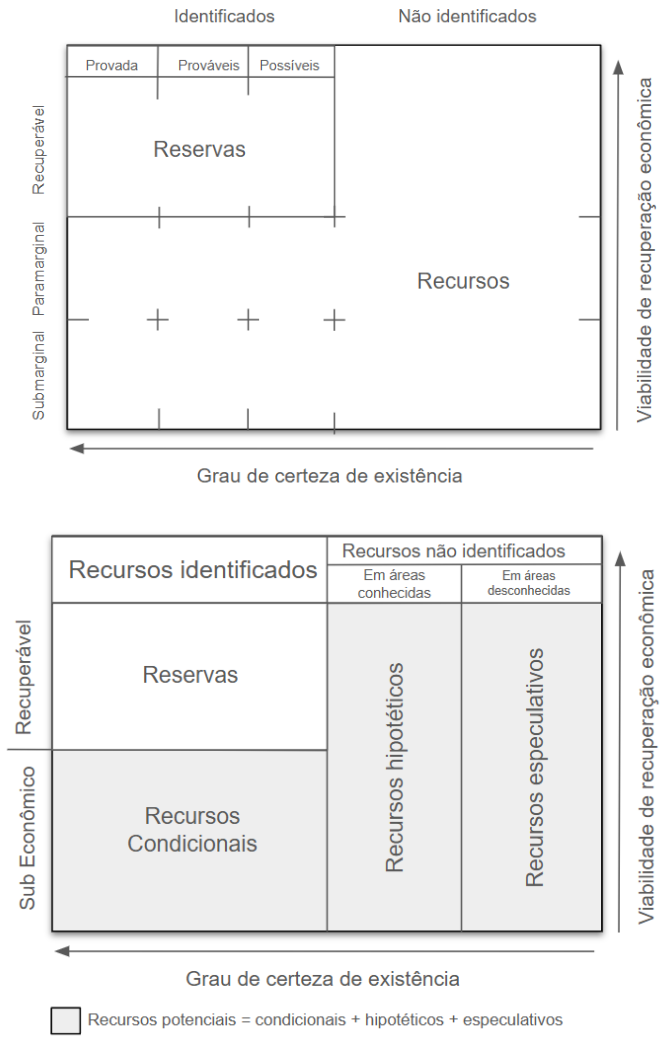


Figura 4 - Diagramas de McKelvey – superior: diagrama proposto por McKelvey em 1972; inferior: diagrama adotado pelo USGS em 1973.

Fonte: Elaboração própria, diagrama superior: adaptado de BROBST, 1973; diagrama inferior: adaptado de MCKELVEY, 1972.

Esse sistema de classificação é a base do padrão internacional desenvolvido pelo "Commitee for Mineral Reserves and International Reporting Standards" (CRIRSCO) para a certificação de Recursos e Reservas Minerais (Figura 5). Apesar de muitas tentativas anteriores de desenvolver um padrão internacionalmente aceito[26], pouco

[26] Blondel e Lasky publicaram um relatório em nome do comitê da sociedade de geólogos econômicos em 1956 definindo recursos e reservas minerais e recomendando regras e definições para suas estimativas. Este comitê era composto por representantes da America do Norte, da America do Sul, Ásia, África, Australia e Europa (BLONDEL E LASKY, 1956).

progresso havia sido feito até 1989, quando o Joint Ore Reserves Comittee (JORC)[27] publicou seu primeiro código de classificação de recursos e reservas minerais na Austrália. Este código foi usado como referência para as normas do Reino Unido, Canadá, África do Sul e Estados Unidos, que posteriormente harmonizaram as principais categorias de recursos e reservas no chamado Acordo de Denver (1997), sob as auspicias do que futuramente seria o CRIRSCO. As mesmas definições seriam adotadas pela ONU na United Nations Framework Classification for Solid Fuels and Mineral Commodities (UNFC), com o objetivo de compatibilizar diferentes sistemas nacionais (WEATHERSTONE, 2008; CALVO et al., 2017; UNITED NATIONS, 2020). Desde 2022, o Brasil adota o padrão CRIRSCO para seu sistema de Certificação de Recursos e Reservas (BRASIL, 2022).

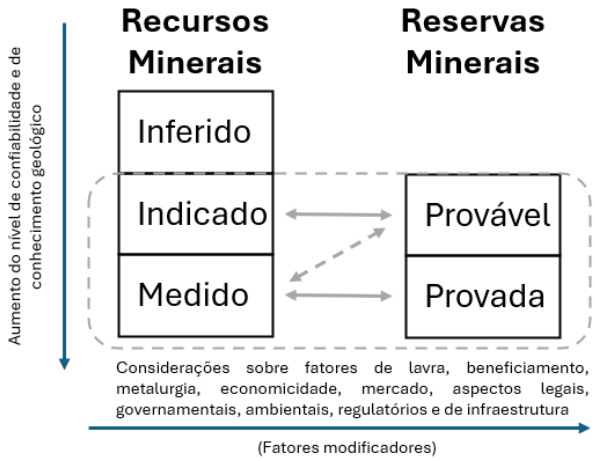


Figura 5 - Definições Padrão CRIRSCO

Fonte: adaptado da Comissão Brasileira de Recursos e Reservas (CBRR, 2022)

Assim, reservas são sempre um subconjunto dos recursos e dependem fortemente de fatores como preço de mercado, custos de extração, grau de conhecimento geológico

[27] O JORC foi formado como resposta à crise no mercado de capitais de Adelaide, na Australia, no fim da década de 1960. A empresa Poseidon reportou a descoberta de um depósito de níquel e cobre que possuía minérios de 3,56% de níquel. Este anúncio ocorria em um momento de choque de oferta e de demanda do mineral - a alta demanda em decorrência da guerra do Vietnam e a baixa oferta relacionada a greves em minas no Canadá, um dos principais produtores da época. As ações da empresa dispararam de 0,85 para 280 dólares australianos entre Setembro de 1969 e Fevereiro de 1970. No entanto, o fim das greves no Canadá e a correção do grau de níquel encontrado no depósito em novos relatórios fez com que os preços das ações despencassem rapidamente. A crise financeira gerada, bem como as suspeitas de relatórios fraudulentos a respeito da qualidade do minério, fez com que o governo Australiano demandasse uma ação da indústria para evitar que esse episódio se repetisse, a qual respondeu como a criação do JORC (VARON, 1971; RENDU E MISKELLY, 2001).

e taxas de recuperação. Conforme o grau de confiabilidade geológica, as reservas são subdivididas em categorias como prováveis e provadas. Essa dependência de condições econômicas e tecnológicas torna as reservas um conceito dinâmico, sujeito a variações significativas ao longo do tempo (WELLMER, 2008; WELLMER E SCHOLZ, 2017; CHARLES et al., 2023). A fim de realçar a dinamicidade desses conceitos, WELLMER (2008) propôs uma versão simplificada do diagrama de McKelvey, a "Total Resource Box", em que setas bidirecionais ilustram as potenciais mudanças entre reservas e recursos, conforme apresentado na figura 6. Além de realçar o caráter dinâmico das classificações de reserva e recurso, sua proposta retoma o conceito do geopotencial com maior ênfase, isto é, recursos futuros que ainda são desconhecidos no presente, indicando que recursos englobam toda abundância elementar de um minério.

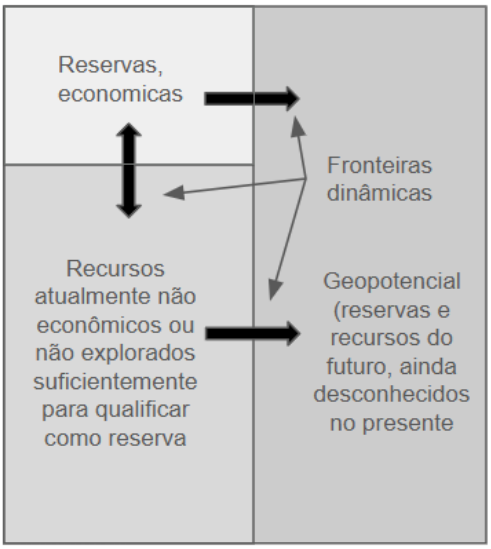


Figura 6 – "Total Resource Box".

Fonte: Elaboração própria, adaptado de WELLMER, 2008 e WELLMER et al., 2024.

2.3.3. Minerais vs. M inérios

Um conceito central que conecta recursos, reservas e preço é o de cut-off grade (esse conceito está intimamente relacionado ao segundo fator elencado por SCHULZ et al. (2017) para explicar escassez). O cut-off grade corresponde ao teor mínimo de um elemento em um minério, a partir do qual sua extração se torna economicamente viável. Acima desse limiar, o mineral é classificado como minério e encaminhado ao beneficiamento, enquanto abaixo dele, é considerado estéril ou rejeito (MOHAMMADI

et al., 2017, VALERO et al., 2021). Esse parâmetro é altamente sensível ao preço do metal, aos custos operacionais e à tecnologia disponível, podendo variar continuamente ao longo do tempo. A elevação do preço de um metal, por exemplo, tende a reduzir o cut-off grade, ampliando o volume de material classificado como minério e, consequentemente, aumentando as reservas reportadas.

A partir dessa relação entre teor de minério e viabilidade econômica, destacam-se dois aspectos centrais: o aumento do consumo energético à medida que os teores diminuem e a tendência histórica de redução dos teores médios[28] (CALVO et. al., 2016; KOPELAAR E KOPELAAR, 2016; MAGDALENA et al., 2021; IEA, 2021). O primeiro aspecto resulta da necessidade de extrair e processar volumes crescentes de material estéril junto ao minério, o que também implica em maior impacto ambiental devido a formação de resíduos, além do maior consumo de água e de insumos para atender a demanda energética (PRIESTER et al., 2019).

O segundo, por sua vez, pode ser interpretado à luz da segunda lei da termodinâmica, conforme formulada por GEORGESCU-ROEGEN (1971). Essa abordagem sustenta que os processos econômicos transformam recursos de baixa entropia – isto é, altamente concentrados, organizados e com elevado potencial útil – em estados de alta entropia, nos quais matéria e energia tornam-se mais dispersas e menos disponíveis para o uso produtivo. Nesse contexto, jazidas de maior teor são explotadas primeiro, enquanto jazidas de menor teor exigem quantidades crescentes de energia para reconcentrar materiais cada vez mais dispersos[29]. À medida que os teores se aproximam da abundância crustal, a intensidade energética da produção mineral cresce exponencialmente, refletindo o caráter irreversível dessa degradação material (CALVO et al., 2016; KOPELAAR E KOPELAAR, 2016). Ambos os aspectos estão relacionados à lógica ricardiana de rendimentos decrescentes na exploração de recursos naturais, cuja

[28] Alguns autores refutam essa tendência e afirmam que não há evidência que a depleção tem afetado o teor dos minérios. Dentre as possíveis justificativas para a redução do teor, destacam-se o avanço tecnológico e o prolongamento da vida das minas, em detrimento da abertura de novas minas (PRIESTER et al., 2019).

[29] Como discutido ao longo do texto, embora o teor de minério constitua uma medida física fundamental da qualidade de oferta, ele não captura integralmente a acessibilidade do recurso. Fatores como profundidade da jazida, condições geológicas e características mineralógicas – por exemplo, a maior complexidade do processamento de minerais sulfetados em comparação aos óxidos – influenciam significativamente os custos de extração e, por conseguinte, a decisão da exploração do recurso (ALONSO et al., 2007).

escassez[30] manifesta-se muito antes de seu esgotamento físico, à medida que as jazidas de maior qualidade e melhor acessibilidade são explotadas prioritariamente (RICARDO, 1821). O consequente aumento de custos de produção e a restrição de oferta tendem a pressionar os preços até atingirem níveis que viabilizem economicamente alternativas e substitutos tecnológicos ("backstop technology") (TILTON, 2001; SARAIVA, 2013).

Essas relações tornam-se particularmente relevantes no caso de elementos minoritários e metais produzidos como subprodutos, tais quais os elementos de terras raras, elementos do grupo da platina, além do cádmio, gálio, índio, selênio e telúrio – todos amplamente utilizados em tecnologias de baixo carbono. Esses elementos raramente formam depósitos próprios e economicamente concentrados. Em vez disso, são normalmente encontrados dispersos aleatoriamente em estruturas cristalinas de minerais formados por elementos geoquimicamente abundantes, onde átomos de elementos escassos substituem, por isomorfismo, átomos de elementos mais abundantes[31] (SKINNER, 1979). Nesses casos, a redução contínua dos teores médios dos minérios aproxima a atual fronteira de exploração à barreira mineralógica, como definida por SKINNER (1979), ponto a partir do qual os elementos escassos não são mais encontrados em depósitos próprios, mas apenas como substitutos isomorfos.

Por este motivo, os elementos minoritários são extraídos quase exclusivamente como subprodutos da mineração de metais hospedeiros, como ferro, cobre, zinco ou chumbo (NASSAR et al., 2015 HU et al., 2024). Nesses casos, tais metais aparecem de forma intersticial em depósitos de metais com propriedades físico-químicas semelhantes, tornando sua produção financeiramente dependente da extração do metal hospedeiro. Dessa forma, o cut-off grade e a produção do metal crítico não são determinados por seu próprio preço, mas pelas condições econômicas do metal principal, o que impõe limites estruturais à expansão de sua oferta, como será visto a seguir.

[31] Substituição isomórfica ocorre quando um átomo de um elemento substitui outro na estrutura cristalina de um mineral sem alterar significativamente sua geometria. Um dos avanços fundamentais da química cristalina foi o reconhecimento de que o raio iônico, mais do que a valência, é o principal fator que controla esse processo. Contanto que a neutralidade elétrica do cristal seja preservada por substituições concomitantes ou pela formação de vacâncias, átomos de diferentes valências podem ocupar a mesma posição cristalográfica. A viabilidade da substituição também depende de fatores como a temperatura da cristalização e o grau de empacotamento da estrutura cristalina (FLEISCHER, 1954).

2.3.4. Companheirismo mineral (Companionality)

Os sistemas minerais são intrinsecamente interligados e, portanto, não podem ser produzidos de maneira independente uns dos outros (VERHOEF et al., 2004). Esse fenômeno, conhecido como companheirismo mineral[32] ("companionality"), expressa o grau em que a oferta de um metal depende da extração de outro, denominado metal hospedeiro (NASSAR et al., 2015). Metais menores, como índio, gálio, cobalto e outros, ocorrem, em geral, em teores extremamente baixos, muitas vezes inferiores a 0,1% (ZEPF et al., 2014; NASSAR et al., 2015), e dificilmente formam depósitos próprios. Assim, sua produção é predominantemente realizada como subproduto da mineração e do refino de metais principais, como zinco, cobre, chumbo, alumínio e ferro, o que torna sua disponibilidade estruturalmente dependente desses hospedeiros. Uma forma de ilustrar essa relação entre os diferentes tipos de produtos é pela roda de companheirismo ("companionality wheel") proposta por NASSAR (2015). A Figura 7 baseia-se na roda de companheirismo e aponta o percentual da produção mundial de determinados elementos como companheiros minerais, ilustrando, também, seus principais elementos hospedeiros.

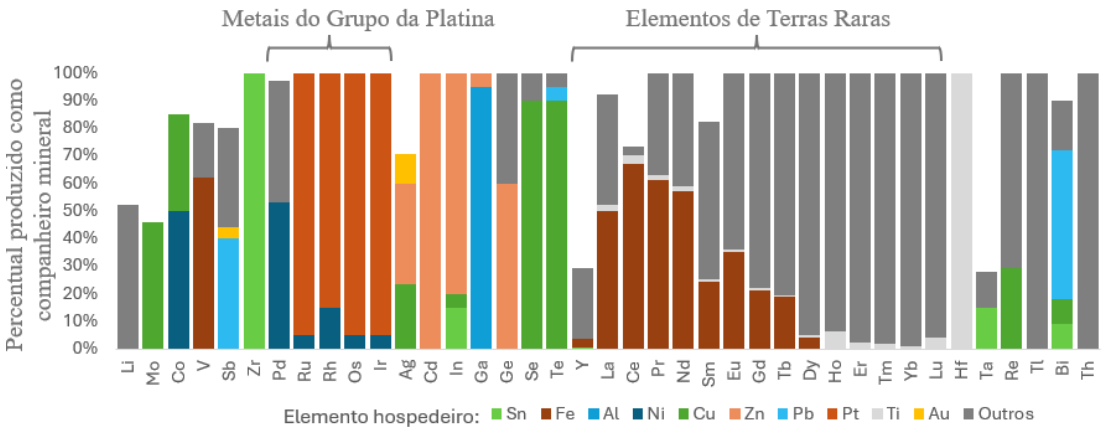


Figura 7 - Produção de companheiros minerais a partir dos seus principais elementos hospedeiros.

Fonte: Elaboração própria, adaptado de Nassar et al., 2015.

O companheirismo mineral, no entanto, não é um atributo estático. Mudanças tecnológicas, redistribuições geográficas da produção, variações nos teores médios e

[32] Na ausência de referências em português sobre o tema durante a revisão bibliográfica, optou-se por essa tradução livre. Alternativamente, poderá ser encontrado o termo "companionalidade" ao longo do texto. Ambos se referem ao conceito "companionality".

alterações na importância relativa de diferentes tipos de depósitos podem modificar, ao longo do tempo, o grau de dependência entre metais. Como exemplo, NASSAR (2015) levantou as variações do grau companheirismo de oito elementos[33], e demonstrou que tanto o Molibdênio, quanto o Rênio apresentaram variações significativas ao longo do tempo (NASSAR et al., 2015). Não obstante a dinamicidade desse atributo, esses indicadores são relativamente estáveis e apresentam pouca volatilidade aparente.

2.3.5. Características de mercado dos metais companheiros

Do ponto de vista econômico, a companheirismo mineral pode ser analisado pela distinção entre metal principal, coproduto e subproduto. Um metal é considerado principal quando sua receita, isoladamente, sustenta a viabilidade econômica da mina; coprodutos contribuem de forma comparável para essa viabilidade; e subprodutos não influenciam a decisão de extração, mas ainda assim sua recuperação é economicamente racional[34] (NASSAR et al., 2015; SCHULZ et al., 2017). Essa classificação reforça que a companionalidade não se resume à co-ocorrência geológica, mas reflete uma dependência financeira que condiciona decisões produtivas.

Embora os tipos de produtos oriundos do companheirismo mineral possuam uma definição robusta, sua classificação é limitada pela restrição de dados transparentes. Tipicamente, mercados de metais companheiros são pequenos, pouco líquidos e frequentemente opacos, com transações realizadas por contratos privados, divulgação limitada de volumes produzidos e preços baseados em estimativas indiretas ou valores declarados (MAXWELL, 2015; NASSAR et al., 2015; REDLINGER E EGGERT, 2016; DESAI, 2023; SHOJAEDDINI et al., 2025). Tais características tornam esses mercados mais arriscados e pouco atrativos para mineradores de médio e grande porte. (MCNULTY et al., 2022). Além disso, essa opacidade contrasta com a relativa transparência dos mercados de metais principais, negociados em bolsas organizadas como a London Mercantile Exchange (LME), a New York Mercantile Exchange (NYMEX) e a Shanghai

[33] Os elementos avaliados foram: Cobalto, Níquel, Cobre, Molibdênio, Prata, Platina, Rênio e Ouro.

[34] Caso a produção do subproduto não seja economicamente racional, ele é considerado material inerte e enviado para a pilha de rejeito.

Metals Market (SMM), em que preços e volumes são amplamente divulgados (FIZAINE, 2015).

Essa rigidez estrutural baseada no companheirismo mineral tem implicações diretas sobre preços e segurança de suprimento. Choques de oferta e demanda frequentemente resultam em forte volatilidade de preços, exacerbada pela pequena escala dos mercados, elevada concentração geográfica da produção e baixa transparência comercial (REDLINGER E EGGERT, 2016; SHOJAEDDINI et al., 2025). Isso deve-se ao fato de a oferta dos subprodutos ser altamente inelástica ao preço no curto prazo, uma vez que aumentos de demanda não se traduzem automaticamente em expansão de produção, já que esta depende, em última instância, do ritmo de extração do metal hospedeiro (NASSAR et al., 2015; REDLINGER E EGGERT, 2016). Similarmente, alterações na produção do metal principal também tendem a mover a curva de oferta dos subprodutos, ampliando sua volatilidade. AFFLERBACH (2014), ao estudar a correlação dos preços de metais principais e de seus subprodutos, chama atenção ao efeito subproduto, em que um choque de demanda do produto principal pode resultar numa relação negativa entre o preço do metal principal e o preço do subproduto.

Diante dessas limitações estruturais, alternativas como reciclagem[35], substituição tecnológica e aumento das taxas de recuperação são frequentemente apontadas como estratégias para mitigar riscos de oferta. Contudo, para a maioria dos metais companheiros, as taxas de reciclagem permanecem extremamente baixas, devido ao uso em pequenas quantidades e em produtos complexos (NASSAR et al. 2015; HU et al., 2024). Além disso, o próprio estoque desses materiais em uso encontra-se altamente disperso em múltiplas aplicações e produtos, o que impõe desafios adicionais à sua recuperação sistemática e compromete a viabilidade técnica e econômica da reciclagem em larga escala (VALERO et al., 2021).

A substituição, por sua vez, é limitada pela especificidade funcional desses metais e, frequentemente, envolve outros metais igualmente companheiros (NASSAR et al., 2015; NASSAR, 2015; SMITH E EGGERT, 2018). Assim, nos curto e médio prazos, o companheirismo mineral permanece como um fator central para explicar a inelasticidade

[35]Apesar de sua enorme relevância para os materiais críticos, a reciclagem é vista como parte da oferta, não sendo, portanto, contemplada em maiores detalhes neste trabalho.

da oferta, a volatilidade de preços e a vulnerabilidade sistêmica associadas a diversos materiais críticos.

2.4. Substituição de materiais: tipologias, limitações e implicações econômicas

A substituição de tecnologias e materiais é frequentemente apontada como uma estratégia central para mitigar riscos associados à escassez, à concentração geográfica da oferta e à volatilidade de preços de materiais críticos (SCHLABACH, 1984; TILTON, 1984; GRAEDEL E ERDMANN, 2012; NASSAR et al., 2015; SMITH E EGGERT, 2018). Trata-se de um processo essencialmente evolutivo, historicamente motivado por redução de custos, ganhos de desempenho e segurança de suprimento, e que, mais recentemente, incorpora restrições regulatórias, preocupações ambientais e objetivos estratégicos. De forma geral, a substituição corresponde à adoção de um material, processo, projeto ou tecnologia alternativa capaz de desempenhar função equivalente, sendo essas dimensões fortemente interdependentes: mudanças de material frequentemente exigem adaptações de processo e de design, enquanto transformações tecnológicas mais profundas tendem a reconfigurar simultaneamente produtos e sistemas produtivos, implicando em mudanças de materiais (SCHLABACH, 1984; TILTON, 1984).

Do ponto de vista tecnológico, a literatura distingue diversas formas de substituição: material, de processo, de projeto (design) e funcional. A substituição material, mais diretamente relacionada à disponibilidade de recursos minerais, pode ainda assumir outras três modalidades. A substituição física (e.g.: elemento-por-elemento, grau-por-grau) envolve a troca direta de um material por outro com propriedades semelhantes. A substituição quantitativa refere-se à redução da intensidade material por unidade de produto. Já a substituição "invisível" ocorre quando outros produtos entram no mercado utilizando materiais diferentes dos tradicionalmente empregados. As substituições de processo e de projeto reduzem o uso de materiais por meio de reorganizações produtivas ou alterações no desenho dos bens, enquanto a substituição funcional envolve soluções tecnológicas inteiramente distintas para cumprir a mesma função (SCHLABACH, 1984).

Complementarmente, é possível classificar a substituição material, porém sob uma ótica econômica: A substituição material-por-material corresponde à troca direta de um insumo por outro (e.g: elemento-por-elemento); a substituição outros-fatores-por-

material reduz o consumo de materiais à custa de maior uso de trabalho, capital ou energia[36]; a substituição qualidade-por-material ocorre quando economias materiais são obtidas mediante redução deliberada do desempenho ou da durabilidade do produto final; e a substituição interproduto altera a combinação de bens e serviços utilizados para satisfazer um fim. Essas categorias destacam que a substituição não depende apenas de preços relativos, mas também de preferências dos consumidores, padrões tecnológicos e mudanças estruturais na economia (TILTON, 1984).

Em seguida, serão discutidos alguns dos tipos de substituição com relação direta à escolha das tecnologias realizadas no capítulo 9.

2.4.1. Substituição material-material (elemento-elemento)

Em termos gerais, elementos quimicamente próximos na tabela periódica tendem a apresentar maior potencial de substituição, pois compartilham configurações eletrônicas semelhantes, raios atômicos comparáveis e propriedades físico-químicas análogas (GRAEDEL, 2013; NASSAR et al., 2015). Essas similaridades explicam por que substituições diretas ocorrem, quando viáveis, sobretudo dentro de um mesmo grupo ou série de elementos. No entanto, mesmo nesses casos, diferenças sutis na estrutura eletrônica e na reatividade podem resultar em perdas relevantes de desempenho ou eficiência energética.

NASSAR (2015) ilustra bem essas restrições ao analisar os metais do grupo da platina (PGMs). Embora os elementos deste grupo possam, em determinadas aplicações catalíticas, substituir-se parcialmente, tais alternativas costumam ser penalizadas pela menor atividade catalítica, maior consumo energético ou novas vulnerabilidades de suprimento. Ademais, esses elementos são predominantemente coproduzidos nos mesmos depósitos minerais, o que reduz sua eficácia como substitutos em contextos de restrição de oferta, uma vez que choques geológicos ou geopolíticos tendem a afetar simultaneamente todo o grupo (NASSAR et al., 2015; GRAEDEL et al., 2015).

À luz das rotas tecnológicas discutidas no capítulo 8, um exemplo representativo dessa limitação é a tentativa de substituir a platina (Pt) por paládio (Pd) em pilhas a

[36] Esse tipo de substituição não é abordado em detalhes neste trabalho pela ausência de exemplos encontrados na literatura a respeito de substituições de outros-fatores-por-material nas rotas tecnologias selecionadas pelo modelo BLUES no cenário desenvolvido.

combustível. Apesar do menor custo relativo e do maior volume de produção do paládio, esse elemento apresenta maior grau de companheirismo mineral e uma estrutura eletrônica que resulta em menor atividade catalítica e menor estabilidade estrutural, quando comparado à platina (WANG et al., 2022; CHANG et al., 2023). Limitações semelhantes são observadas na substituição entre elementos de terras raras em ímãs permanentes. Embora tecnicamente possível trocar o disprósio por térbio como elemento de terra rara pesada (ETRP), podendo inclusive reduzir a demanda total de ETRP, essa alternativa enfrenta restrições associadas ao elevado grau de coprodução desses elementos e, frequentemente, ao maior preço do Térbio (SMITH E EGGERT, 2016; SMITH E EGGERT, 2018). Esses exemplos reforçam que, mesmo quando a proximidade na tabela periódica favorece a substitutibilidade técnica, fatores geológicos, econômicos e tecnológicos impõem limites severos à substituição elemento-por-elemento em aplicações críticas.

Não obstante, há alguns casos bem-sucedidos de substituição elemento-por-elemento. Naturalmente, a evolução recente das baterias NMC para químicas com maior conteúdo de níquel, em detrimento do cobalto, tem ocorrido devido ao seu melhor desempenho eletroquímico e a sua maior sustentabilidade da cadeia de suprimentos. O aumento do teor de níquel nos cátodos NMC (como NMC 622, NMC 811 e NMC 955) resulta em maiores capacidades específicas, maior densidade de energia e maior potencial médio de descarga, o que se traduz em maior autonomia para veículos elétricos e melhor aproveitamento volumétrico em aplicações estacionárias (para mais detalhes, ver a Seção 8.1.1.3).

2.4.2. Substituição qualidade-por-elemento

Esse tipo de substituição é possível quando há uma sobre especificação na qualidade dos materiais ou em produtos intermediários ou finais. SMITH E EGGBERT (2018) destacam a redução do grau de ímãs permanentes em turbinas eólicas, rebaixando sua temperatura máxima de operação. Ímãs permanentes de menor grau possuem também menores quantidades de elementos de terra rara pesados, aliviando sua demanda. Vale destacar que esse processo demanda adaptações nas turbinas eólicas para que possam operar com ímãs permanentes de menor grau, o que torna esse processo de substituição mais custoso e de maior inércia. Outro possível exemplo é a troca de baterias NMC por

baterias LFP nos veículos elétricos[37]. Estas possuem menor densidade energética volumétrica, reduzindo a autonomia dos veículos. Em contrapartida, possuem preço mais competitivo e menor grau de criticidade, devido a menor demanda de materiais críticos como níquel e cobalto (para mais detalhes, ver seção 8.1.1.3).

2.4.3. Substituição de processos-por-elemento

As substituições de processos são as principais responsáveis para a maioria da redução de custos em processos de manufatura, podendo ir desde a eliminação de uma de suas etapas, até o desenvolvimento completo de um novo processo (SCHLABACH, 1984). Dois avanços técnicos relacionados a produção de ímãs permanentes ocorreram em meio ao choque de oferta de elementos de terras raras no início da década 2010, motivado pela restrição de exportações da China. Nesse contexto, a melhoria da microestrutura dos ímãs permanentes por meio do processo de difusão na fronteira de grão ("grain boundary diffusion") e a utilização de ligas Fe-Dy, ao invés do Dy puro, permitiram a redução de elementos de terra rara pesados entre 40% e 50%. Ambas as tecnologias já eram conhecidas antes do choque de preços, mas sua adoção havia sido limitada por custos elevados. O aumento abrupto dos preços das terras raras atuou como catalisador para sua difusão (SMITH E EGGERT, 2018). Já no campo da energia solar, avanços no corte com serra de fio diamantado ("diamond wire sawing") permitiu a redução de custos e do uso de material (Poli-Silício) na produção de wafers de silício monocristalino ao reduzir as perdas de kerf (VDMA, 2025). Apesar de representarem uma alternativa economicamente viável no longo prazo, esse tipo de substituição geralmente é mais capital-intensivo e possui maior inércia de implementação, fazendo com que seja uma resposta difícil de se implementar em choques de curta duração.

2.4.4. Substituição interproduto

A substituição interproduto é, possivelmente, a categoria mais abrangente de substituição, pois envolve a troca entre produtos ou tecnologias distintas que cumprem uma mesma função final. Esse tipo de substituição pode ocorrer em diferentes níveis:

[37] Seria possível classificar esse tipo de substituição como uma substituição interproduto, sob argumentos de que, apesar de ambas serem baterias de íon-lítio, tratam de dois tipos de baterias diferentes – a NMC e a LFP. Essa argumentação é válida e não foi ignorada. Não obstante, a clara desvantagem em termos de densidade energética volumétrica foi determinante para a escolha da substituição qualidade-material, a fim de ilustrar esse tipo de substituição.

desde a escolha entre subtecnologias dentro de uma mesma tecnologia (e.g.: filmes finos vs. silício monocristalino; baterias convencionais vs. baterias de fluxo; geradores síncronos vs. geradores de indução), a substituição entre tecnologias concorrentes (solar vs. eólica na geração elétrica; veículos elétricos vs. veículos a combustão interna no transporte) ou até a substituição entre sistemas.

Essas transições são impulsionadas por múltiplos fatores. Questões regulatórias (como ocorrido na substituição de baterias Ni-Cd em favor de baterias de íon-lítio), considerações estratégicas e de segurança de suprimento (como a substituição de baterias NMC por LFP para reduzir a dependência de cobalto e níquel - ver Nota 13) também são exemplos destes fatores. Além disso, avanços tecnológicos podem tornar determinadas alternativas mais atraentes do ponto de vista tecnoeconômico, combinando menor custo, maior eficiência, maior durabilidade ou melhor desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida e sendo fatores naturais para a substituição de tecnologias mais antigas.

A literatura recente mostra que as escolhas tecnológicas associadas à substituição interproduto têm impactos significativos sobre a demanda de materiais críticos, tanto sobre sua composição, quanto sua intensidade. PAVEL et al., (2017) analisam estratégias de substituição para reduzir o uso de terras raras nas turbinas eólicas. XU et al. (2024) investigam as implicações materiais da escolha entre diferentes arquiteturas de painéis fotovoltaicos de silício. MANBERGER E STENQVIST (2018) analisam como a substituição entre subtecnologias solares e eólicas altera os fluxos globais de metais, enquanto XU et al. (2020) avaliam como distintas químicas de baterias de íon-lítio resultam em trajetórias divergentes de demanda por lítio, cobalto, níquel, manganês e grafite. De forma geral, esses estudos evidenciam que a substituição interproduto não apenas redistribui a demanda entre materiais, mas pode alterar estruturalmente os riscos de escassez, coprodução e concentração geográfica do suprimento. Em última análise, esse é o principal tipo de substituição explorado no presente trabalho, uma vez que a análise de cenários tecnológicos permite capturar, de forma integrada, os efeitos sistêmicos das escolhas tecnológicas sobre a demanda futura de materiais críticos.

De maneira geral, apesar de sua importância histórica, a substituição enfrenta limites significativos no curto prazo, impostos por trancamento tecnológico, investimentos afundados e dependência de propriedades materiais específicas. Sistemas produtivos frequentemente são otimizados em torno de determinados materiais, e sua substituição exige tempo, capital e aprendizado. Respostas baseadas em soluções já

disponíveis tendem a ocorrer relativamente rápido, enquanto aquelas que exigem inovação significativa ou mudanças sistêmicas demandam períodos mais longos – muitas vezes incompatíveis com choques de preços de curta duração. Assim, a capacidade de substituição no curto prazo é estruturalmente limitada. Evidências empíricas indicam que, no curto prazo, choques de preços tendem a ser absorvidos por repasse de custos ou compressão de margens, enquanto a substituição efetiva ocorre majoritariamente no médio e longo prazo, quando ajustes tecnológicos se tornam viáveis (TILTON, 1984; SMITH E EGGERT, 2016).

3. Conversores energéticos associados a materiais críticos

Este capítulo dedica-se à revisão bibliográfica de conversores energéticos tipicamente associados a materiais críticos. Para tanto, foram analisadas as principais famílias tecnológicas, tecnologias específicas ou subtecnologias vinculadas às rotas de baixo carbono, de modo a avaliar suas vantagens, limitações e os compromissos técnico-econômicos inerentes às escolhas tecnológicas. Essa avaliação fundamenta a definição das penetrações tecnológicas em cada um dos cenários de substituição analisados, conforme disposto na seção X. Além disso, buscou-se trazer informações relevantes em torno dos aspectos construtivos e materiais das subtecnologias avaliadas, em consonância ao escopo do trabalho.

Ressalta-se, no entanto, que não há a intenção de realizar uma revisão exaustiva das rotas tecnológicas, mas, antes, pretende-se compreender suas trajetórias de desenvolvimento por meio da análise de substituições produto-produto observadas ao longo do tempo. Assim, as análises contemplam tecnologias maduras – tanto as que já detiveram maior participação de mercado e atualmente encontram-se defasadas, quanto as tecnologias atualmente incumbentes – e, em alguns casos, tecnologias emergentes, próximas à maturidade comercial, com potencial de avanços técnicos e de ganho de participação no horizonte temporal considerado. As rotas tecnológicas analisadas são: baterias eletroquímicas, pilhas a combustível[38], motores elétricos, geradores de turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos.

3.1. Baterias veiculares e estacionárias

As baterias são conjuntos de células eletroquímicas capazes de converter energia química em energia elétrica por meio de reações redox controladas. Elas desempenham um papel fundamental em sistemas de armazenamento de energia, sendo amplamente utilizadas em aplicações que vão desde dispositivos eletrônicos portáteis até veículos

[38] Optou-se por não analisar eletrolisadores, pois, embora sejam conversores tipicamente associados à transição energética, suas famílias tecnológicas são, essencialmente, as mesmas das pilhas à combustível. Dessa forma, eletrolisadores e pilhas a combustível compartilham os mesmos fundamentos eletroquímicos, além de materiais e arquiteturas semelhantes. Isso decorre do fato de as reações das pilhas a combustível serem as reações inversas das reações de um eletrolisador equivalente (PARK et al., 2012; NGUYEN E BLUM, 2016). Com efeito, pilhas a combustível reversíveis (ou regenerativas) podem atuar ora como pilha a combustível, ora como eletrolisadores, a depender do sentido da reação (produção de eletricidade ou de Hidrogênio). Além disso, como será visto posteriormente (Seção 6.1), os eletrolisadores não foram selecionados endogenamente pelo modelo BLUES.

elétricos e sistemas de apoio à rede elétrica (GOODENOUGH E KIM, 2009; GOODENOUGH, 2012; KUBOTA et al. 2017).

Em uma bateria, as reações químicas ocorrem em todo o volume dos materiais sólidos dos eletrodos. Por esse motivo, esses materiais devem ser projetados de modo a permitir a entrada das espécies reagentes em toda a sua estrutura e a posterior remoção dessas espécies após a reação. Esse processo precisa ocorrer milhares de vezes para que a bateria seja recarregável e comercialmente viável. No entanto, as reações químicas nem sempre são facilmente reversíveis, uma vez que mudanças estruturais nos materiais dos eletrodos podem ocorrer ao longo dos ciclos de carga e descarga, afetando o desempenho e a vida útil do sistema (WITTINGHAM, 2012).

De maneira geral, os componentes ativos das baterias são o catodo, o anodo, o eletrólito e a membrana separadora. O catodo é o eletrodo eletronegativo para o qual os elétrons fluem através do circuito externo, formando, assim, uma corrente elétrica. Para manter o equilíbrio de cargas, cátions se deslocam pelo eletrólito da bateria do anodo para o catodo. O eletrólito, líquido ou sólido, permite exclusivamente o transporte de íons, impedindo a passagem de elétrons. Para garantir que os dois eletrodos não entrem em contato direto, um separador poroso é colocado entre eles, permitindo o fluxo iônico enquanto evita curtos-circuitos internos (GOODENOUGH E KIM, 2009). A tabela 9 apresenta diferentes baterias e suas composições básicas.

Tabela 1 - Diferenciação das baterias convencionais em relação ao catodo, anodo e eletrólito.

Tecnologia	Catodo	Anodo	Eletrólito
Pb-ácido	Chumbo esponjoso	Dióxido de chumbo	Ácido sulfúrico (37,7%)
NiMH	Hidróxido de níquel	Ligas absorvedoras de hidrogênio	Hidróxido de potássio
Ni-Cd	Hidróxido de níquel	Cádmio metálico	Eletrólito alcalino
Li-íon	Óxidos metálicos de lítio	Carbono ou grafita	Eletrólito contendo sal de lítio dissolvido em carbonatos orgânicos
Na-S	Enxofre fundido	Sódio fundido	Cerâmica beta-aluminosa não aquosa
$NaNiCl_2$	Pó de níquel	Sódio metálico dissolvido	Cloreto de sódio fundido com adição de cloreto de lítio ou cloreto de potássio
Na-íon	Óxido de sódio, fosfato de sódio ou sulfato de sódio	Grafita ou outros materiais de carbono	Íons de sódio aquoso

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de RAND E MOSELEY, 2015; BERNARD E LIPPERT, 2015; NADEEM et al., 2019; MITALI et al., 2022.

As baterias podem ser tipicamente classificadas quanto a reversibilidade das reações – primárias (não recarregáveis) e secundárias (carregáveis) – e quanto ao seu design, isto é, se seus componentes são integrados (baterias convencionais) ou externos (baterias de fluxo). No caso de sistemas com armazenamento externo, os componentes, isto é, a unidade de conversão de energia e o material ativo, estão fisicamente separados (TOMAZIC, 2015; AMROUCHE et al., 2016; KANDHASAMY et al., 2024). Essa separação fornece maior flexibilidade ao sistema, pois é possível ajustar a capacidade de armazenamento de energia e a potência de forma independente, mediante a necessidade de cada aplicação. O exemplo de bateria externa de maior destaque é a bateria de fluxo redox de vanádio (VRFB, em inglês).

Nas baterias convencionais, não há separação física entre a unidade de conversão de energia e o material ativo, ou seja, todos os componentes estão juntos no mesmo espaço. Consequentemente, a quantidade de energia que pode ser armazenada e a potência que o sistema pode fornecer estão diretamente ligadas ao tamanho da bateria e às suas propriedades eletroquímicas. Alguns exemplos de baterias convencionais são as baterias de chumbo-ácido, de íon-lítio, sódio-enxofre, níquel-cádmio e níquel-hidreto metálico (NADEEM et al., 2019).

3.1.1. Baterias convencionais

3.1.1.1. Família do chumbo - Baterias de Chumbo-ácido (Pb-ácido)

As baterias de chumbo-ácido destacam-se como a primeira bateria recarregável difundida em larga escala. Elas desempenharam um papel fundamental nos estágios iniciais das redes elétricas públicas, período em que predominavam sistemas urbanos de corrente contínua de baixa tensão. Assim, essas baterias foram empregadas tanto para suprir picos de potência, quanto para o armazenamento de energia de curto prazo (MAY et al., 2017).

Do ponto de vista construtivo, destacam-se dois principais tipos: as baterias inundadas e as reguladas por válvula ("valve-regulated lead–acid", VRLA)[39]. Em ambas, os eletrodos são constituídos por chumbo esponjoso (Pb^0) e dióxido de chumbo (PbO_2), enquanto o ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluído atua como eletrólito. Uma característica particular desse sistema é a participação direta do eletrólito nas reações eletroquímicas, funcionando como reagente durante a descarga e como produto durante a carga (WAGNER, 2007; RAND E MOSELEY, 2015). Durante sua descarga, sulfato de chumbo é formado e depositado em ambos os eletrodos e há a formação de água no eletrótito. A (re)carga, por sua vez, regenera seus estados originais (RAND E MOSELEY, 2015; MITALI et al,. 2022).

Embora o chumbo seja toxico, o design confinado VRLA e sua cadeia de reciclagem altamente consolidada, com taxas próximas a 100%, contribuem para a redução de seu impacto ambiental (YIN et al., 2022). Estima-se que cerca de 86% do chumbo produzido globalmente seja destinado à fabricação de baterias, sendo aproximadamente 65% da produção total de chumbo refinado proveniente de material reciclado (ILZSG, 2023).

Apesar da robustez, do baixo custo e da ampla maturidade tecnológica, as baterias de chumbo-ácido apresentam elevada taxa de auto-descarga e baixas densidades energéticas gravimétrica e volumétrica, o que restringe sua aplicação em sistemas móveis. Em aplicações estacionárias, entretanto, essas limitações são menos críticas, razão pela qual essa tecnologia foi amplamente empregada em sistemas isolados ao longo dos anos 2000 (WAGNER, 2007; KESHAN et al., 2009). Não obstante, nesses sistemas e em sistemas conectados à rede, a operação frequente em estados parciais de carga favorece a sulfatação no catodo[40], resultando em perda de capacidade e redução da vida útil da bateria (MAY et al, 2018).

---

[39]Entre os dois designs, as baterias inundadas, apesar de mais baratas, possuem algumas desvantagens relacionadas a maior demanda de manutenção. Entre seus desafios, destacam-se estratificação do eletrólito e a decomposição da água e consequente formação de gases oxigênio e hidrogênio, o que também constitui riscos explosivos. A VRLA , em contrapartida, é confinada e o oxigênio formado é recombinado no eletrodo negativo, formando água novamente. Esse ciclo de oxigênio reduz a eletronegatividade do catodo, reduzindo a taxa de formação de H2. Uma válvula de alívio de pressão possibilita o expurgo do hidrogênio que é, todavia, formado, evitando seu acúmulo na bateria e justificando seu nome (RAND E MOSELEY, 2015).

[40] A sulfatação é o acúmulo de sulfato de chumbo nos eletrodos, cuja formação ocorre durante a descarga das baterias (RAND E MOSELEY, 2015).

Os desenvolvimentos mais recentes deste tipo de bateria são sua forma híbrida, acoplada a supercapacitores (Ultrabattery), e a as baterias de chumbo-carbono. A adição do carbono no eletrodo negativo permite a maior potência específica, aumento da vida útil em ciclagem[41] e a redução da sulfatação decorrente de sua operação em estados parciais de carga (MAY et al., 2018; YIN et al., 2022).

3.1.1.2. Família do Níquel - Baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) e Hidreto de Níquel metálico (NiMH

Ambas as baterias Ni-Cd e NiMH utilizam hidróxido de níquel ($Ni(OH)_2$) em seu catodo. Dessa forma, a principal distinção entre essas tecnologias reside no material do anodo. Nas baterias Ni-Cd, o anodo é constituído por hidróxido de cádmio ($Cd(OH)_2$), enquanto nas baterias NiMH utiliza-se um metal (M), tipicamente do tipo AB_5, que atua como um composto de intercalação[42], isto é, um hospedeiro de íons (WHITTINGHAM, 2012; BERNARD E LIPPERT, 2015). O exemplo clássico deste tipo de metal é o $LaNi_5$, embora diversos outros elementos de terras raras possam substituir o Lantânio, e diferentes elementos críticos possam ser adicionados ao Níquel como aditivos. Esse processo de otimização levou ao desenvolvimento de ligas complexas, como a $(LaCePrNd)(NiAlMnCo)_5$. O eletrólito de ambas as baterias é, tipicamente, uma solução alcalina concentrada, como KOH, NaOH e LiOH (BERNARD E LIPPERT, 2015).

Uma das principais características das baterias de Ni-Cd é o seu bom índice de ciclagem e a longa vida das baterias, atribuídos à elevada estabilidade dos materiais ativos da bateria. (BERNARD E LIPPERT, 2015; MITALI et al., 2022). Esse desempenho é mantido mesmo em operações com estados de carga parciais e em condições de alta temperatura. Além disso, essas baterias apresentam densidade energética volumétrica e gravimétrica superiores às baterias de chumbo, embora ainda inferiores aos demais tipos de baterias (WITTINGHAM, 2012; VAN NOORDEN, 2014; MITALI et al., 2022).

Por outro lado, as baterias Ni-Cd são penalizadas pela perda de capacidade após sucessivas descargas completas. Esse fenômeno conhecido como efeito memória é

[41] Ciclagem ("cycle life") – O número de ciclos de cargas e descarga, após o qual a capacidade energética da bateria cai para 80% de seu valor nominal.

[42] Em química, intercalação é a inserção reversível de um íon ou molécula em uma rede cristalina sem qualquer alteração significativa dessa rede, exceto por uma pequena expansão ou contração (WHITTINGHAM, 2012).

geralmente atribuído ao rearranjo de prótons nas camadas de níquel no eletrôdo postivo, o que reduz sua condutividade eletrônica (BERNARD E LIPPERT, 2015). Além disso, a toxicidade do cádmio constitui uma limitação ambiental relevante, a qual vem sendo respondida com forte regulamentação. Como exemplo, além do banimento de algumas aplicações na Europa, (Parlamento europeu, 2013), há um grande esforço voltado para a reciclagem dessas baterias ou para seu descarte adequado (OREFICE et al., 2024).

As baterias de NiMH, por sua vez, operam em uma faixa de operação de temperatura semelhante à da NiCd, tipicamente entre -40°C a +70°C, embora apresentem menor vida útil. Suas maiores densidade de energia volumétrica e gravimétrica são acompanhadas a custos mais elevados em função do uso de materiais críticos nas ligas do anodo (KURZWEIL, 2015; BERNARD E LIPPERT, 2015). Elas foram amplamente utilizadas nas primeiras gerações de veículos elétricos híbridos, como as versões mais antigas do Toyota Prius, em razão de sua segurança e boa ciclagem. Posteriormente, no entanto, essas baterias foram progressivamente substituídas pelas baterias de íon-lítio (WITTINGHAM, 2012; TOYOTA, 2025).

Por fim, vale destacar que ambas as baterias apresentam taxas elevadas de auto-descarga no início de sua vida útil, fenômeno que é posteriormente é atenuado (BERNARD E LIPPERT, 2015; MITALI et al., 2022).

3.1.1.3. Baterias de íon-lítio (Li-íon)

De maneira geral, as baterias de íon-lítio são compostas por um eletrólito de sal de lítio em solução orgânica, um anodo de carbono (normalmente a grafita), um catodo de óxido de lítio metálico e um filme de interface entre o sólido e o eletrólito (SEI[43]) – este filme atua como uma camada protetiva que impede a reação contínua entre os eletrodos e o eletrólito (KURZWEIL, 2015; XIE E LU , 2020; MITALI et al., 2022).

Atualmente, as baterias de íon-lítio são as mais relevantes nos setores de transporte e de armazenamento estacionário. Esse domínio ocorre em função de sua elevada densidade energética, alta eficiência, longa vida útil, baixa autodescarga e ausência do efeito memória (DING et al., 2018; MITALI et al., 2022). Tais características derivam, em grande parte, das propriedades do lítio, como baixos peso e raio atômico e elevada eletronegatividade, além da estrutura química dessas baterias, que assim como as

[43] Solid-Electrolite Interface – Interface sólido-eletrólito

baterias de NiMH, se baseiam nas reações de intercalação (WITTINGHAM, 2012; KURZWEIL, 2015).

No que se refere ao anodo, há crescente interesse na incorporação de outras composições, como ligas de lítio e silício. Isso decorre da baixa capacidade de armazenamento e as preocupações de segurança associadas à Grafita (NZEREOGU et al., 2022). Enquanto o grafite permite a intercalação de aproximadamente um átomo de lítio para cada seis átomos de carbono, o silício pode acomodar até quatro átomos de lítio por átomo de silício, o que resulta em um aumento significativo da capacidade de armazenamento teórica e possibilita um carregamento mais rápido da bateria. Todavia, a grande variação volumétrica do anodo durante os ciclos de carga e descarga impõe desafios mecânicos e de estabilidade, que ainda limitam sua aplicação comercial (GOODENOUGH E KIM, 2009; WHITTINGHAM, 2012; DENG, 2015).

A busca por ligas de lítio, por sua vez, busca a aditivação com alumínio, estanho, magnésio, prata e antimônio também devido à alta capacidade energética específica atribuída a eles (NZEREOGU et al., 2022). No entanto, essa alternativa esbarra em desvantagens similares às do silício, como a grande variação do volume de anodo durante a inserção e extração dos íons de lítio e à baixa condutividade elétrica desses anodos (NZEREOGU et al., 2022).

Já em relação ao catodo, além da composição química, ambas morfologia e estrutura cristalina do eletrodo são importantes para sua performance eletroquímica (EVRO et al., 2024). Há três tipos de estruturas cristalinas associadas ao íon-lítio: Estrutura por camadas (e.g.: LCO, NMC), olivinas (e.g.: LFP, LMFP) e espinélios (e.g.: LMO). As estruturas de espinélios permitem o rápido movimento do íon-lítio ao longo da sua cadeia tridimensional, possibilitando uma alta potência específica e boa estabilidade. Contudo, sua baixa capacidade energética inviabiliza sua utilização em veículos elétricos e armazenamento estacionário de energia (MARIE E GLIFFORD, 2023).

A primeira estrutura a alcançar sucesso comercial foi a LCO ($LiCoO_2$). Essa estrutura apresentou avanços significativos em relação às baterias de chumbo-ácido e de níquel, especialmente no que se refere à densidade de energia gravimétrica e volumétrica, viabilizando sua ampla adoção em dispositivos eletrônicos portáteis (WITTINGGAM, 2012; DENG, 2015; MARIE E GLIFFORD, 2023). O alto preço do cobalto, impulsionado pela própria expansão do mercado de baterias, motivou esforços para reduzir sua participação na composição química dos catodos (WHITTINGHAM, 2012;

XIE E LU, 2020). Nesse contexto, foram desenvolvidas as baterias NMC ($LiNi_xMn_yCo_{1-x-y}O_2$, x+y=1) e NCA ($LiNi_xCo_yAl_zO_2$, x+y+z=1) (WHITTINGHAM, 2012).

Em ambas as químicas, as reações eletroquímicas ocorrem com os íons de níquel, com participação limitada do cobalto, enquanto o manganês e o alumínio estabilizam a rede cristalina durante o processo nas baterias NMC e NCA, respectivamente. Não obstante, o cobalto possui um papel importante de aumentar a condutividade eletrônica e minimizar a migração dos íons de níquel para o Lítio (LI et al., 2018). O arranjo cristalino em camadas alternadas é responsável pela habilidade de armazenar níveis elevados de energia, ainda que sua estrutura seja instável sob estresses físicos e favoreça fuga térmica[44]. O uso de metais de transição, que existem em diferentes níveis de oxidação, contribui para a aumentar a atividade eletroquímica dessas baterias, facilitando a eficiência das reações de intercalação do lítio durante os ciclos da bateria (EVRO et al., 2024).

Em relação à composição das estruturas em camada, observa-se um movimento consistente da indústria automotiva em direção à adoção de químicas NMC ricas em níquel, motivado principalmente pela redução de custos, uma vez que o níquel apresenta menor criticidade e menor custo relativo quando comparado ao cobalto, e pela maior densidade energética dessas químicas (MARIE E GLIFFORD, 2023). Nesse contexto, tecnologias como NMC-622, NMC-811[45] e NCA têm sido priorizadas como soluções otimizadas para aplicações automotivas, equilibrando desempenho eletroquímico e custo. Em contrapartida, a redução da intensidade de cobalto nas baterias reduz a estabilidade térmica e a ciclagem das baterias (LI et al., 2018; MARIE E GLIFFORD, 2024).

Embora NMC-811 e NCA apresentem composições químicas e capacidades semelhantes, os dopantes desempenham papéis distintos na estabilidade estrutural: a presença de manganês no NMC-811 confere maior estabilidade térmica, elevando a temperatura de início de reações exotérmicas para cerca de 220 °C, em comparação a aproximadamente 180°C nas químicas NCA dopadas com alumínio (DING et al., 2019). Por este motivo, as baterias NMC-811 apresentam menor risco de fuga térmica.

---

[44] Fuga térmica - é um processo de feedback positivo, em que uma bateria gera mais calor do que consegue dissipar, elevando sua temperatura rapidamente e causando reações químicas que liberam ainda mais calor, podendo levar a incêndios ou explosões.

[45] As baterias NMC são nomeadas de acordo com a razão entre os elementos presentes no catodo. Dessa forma, a NMC622 refere-se às baterias $Li[Ni_{0,6}Co_{0,2}Mn_{0,2}]O_2$ e a NMC811 refere-se às baterias $Li[Ni_{0,8}Co_{0,1}Mn_{0,1}]O_2$.

Por fim, foi desenvolvido materiais baseados na estrutura olivina – $LMPO_4$ – em que M pode ser Fe, Ni, Co, Mn ou uma combinação destes. A escolha pelo Fe foi natural, em função de seu baixo custo, dando origem às baterias LFP (GOODENOUGH E PARK, 2013). Seu arranjo molecular fornece uma estrutura estável, resultando em maior segurança, ciclagem e vida-útil, apesar de comportar menor capacidade de armazenamento de energia (XIE E LU, 2020; EVRO et al., 2024). Enquanto a estabilidade mecânica da célula é relacionada à estrutura cristalina, a estabilidade térmica é atribuída às fortes ligações P=O do fosfato, que inibem reações exotérmicas indesejadas e previnem, assim, a formação das condições necessárias para a fuga térmica da bateria (EVRO et al., 2024). Atualmente, busca-se incrementar a densidade energética dessas estruturas por meio da adição de Manganês (LMFP), sendo essa a próxima geração das baterias olivinas. Desafios relacionados ao design estrutural e ao equilíbrio da performance dessas baterias ainda são um entrave para sua ampla adoção (QIU et al., 2025).

3.1.1.4. Família de baterias de sódio - Baterias sódio-β e Baterias de Íon-Sódio

As baterias à base de sódio abrangem diferentes arquiteturas eletroquímicas e têm despertado interesse para aplicações estacionárias e veiculares, principalmente devido à abundância do sódio e ao potencial de redução de custos. De forma geral, essas tecnologias podem ser divididas em duas grandes categorias: baterias de alta temperatura do tipo sódio-beta (Na-β) e baterias de íon-sódio (Na-íon).

As baterias da família sódio-beta são dispositivos de alta temperatura nos quais o sódio metálico atua como material ativo no eletrodo negativo, enquanto um eletrólito cerâmico de beta-alumina desempenha simultaneamente as funções de separador e condutor iônico (MOSELEY E RAND, 2015). A condução iônica eficiente da beta-alumina exige temperaturas elevadas, tipicamente entre 270 °C e 350 °C, nas quais os materiais ativos encontram-se em estado líquido (MOSELEY E RAND, 2015; ARMAND et al., 2023). Dessa forma, sua operação ocorre de maneira “inversa” a maioria das baterias eletroquímicas convencionais, em que os eletrodos se encontram, geralmente, em estado sólido e o eletrólito, líquido.

Atualmente, apenas duas tecnologias dessa família alcançaram maturidade tecnológica relevante: a bateria de sódio-enxofre (Na-S) e a bateria de sódio-níquel-

cloreto ($NaNiCl_2$), também conhecida como ZEBRA (ZEolite Battery Research Africa[46]) (MOSELEY E RAND, 2015; IQBAL, 2023; ARMAND et al., 2023). As baterias Na-S utilizam sódio metálico no eletrodo negativo e enxofre no eletrodo positivo, ambos em estado líquido durante a operação. Em comparação com tecnologias convencionais anteriores ao íon-Li, como as baterias da família de chumbo e de níquel, as baterias Na-S apresentam maior energia específica, longa vida útil e utilizam materiais relativamente baratos e pouco tóxicos (AMROUCHE et al., 2016; LIU et al., 2022). Por estes motivos, eram a bateria eletroquímica mais utilizadas para o armazenamento estacionário até 2010, antes do domínio das baterias de íon-lítio (MOSELEY E RAND, 2015).

As baterias Na-MCl_2, conhecidas como ZEBRA, compartilham a mesma arquitetura básica das Na-S, com sódio metálico no eletrodo negativo e eletrólito sólido de beta-alumina. A principal diferença reside no eletrodo positivo, que utiliza um metal de transição na forma de cloreto – predominantemente níquel ($NiCl_2$) e ferro ($FeCl_2$). Essa configuração resulta em uma maior faixa de temperatura operacional, menor corrosividade interna e produtos de reação mais seguros quando comparados às baterias Na-S (MOSELEY E RAND, 2015; AMROUCHE et al., 2016; LIU et al., 2022). Em contrapartida, o uso de níquel e seu processo de fabricação complexo resultam em custos mais elevados. Além disso, assim como nas Na-S, a necessidade de operação em altas temperaturas exige sistemas dedicados de gerenciamento térmico, o que limita sua competitividade frente a tecnologias de operação em temperatura ambiente (MOSELEY E RAND, 2015).

As baterias de íon-sódio fazem parte de um amplo esforço de substituir as baterias de íon-lítio em prol de materiais abundantes e de menor custo. Metais alcalinos e metais alcalinos terrosos como Na+, K^+ e Mg^{2+} têm sido alvos de intensa pesquisa por corresponderem positivamente a esses requisitos (KUBOTA et al., 2018; XIN et al., 2024). Como abordado na Seção 5.1, elementos próximos na tabela periódica apresentam propriedades físico-químicas semelhantes, fazendo do Na^+ a alternativa mais estudada e

[46] Este nome deriva do projeto no centro de pesquisa "Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) em Petrora, Africa do Sul (ARMAND, 2023).

a que mais tem atraído o foco de fabricantes[47] (AU et al., 2022; GABRIEL et al., 2023; XIN et al., 2024).

As baterias de íon-sódio, por sua vez, apresentam arquitetura e princípio de funcionamento muito semelhantes aos das baterias de íon-lítio, utilizando o princípio da intercalação e os íons Na^+ como portadores de carga (GOIKOLEA et al., 2020). Do ponto de vista eletroquímico, os principais desafios das baterias de íon-sódio estão associados à cinética mais lenta dos íons Na^+ em comparação aos íons Li^+, decorrente de seu maior raio iônico (GOODENOUGH E PARK, 2013; GABRIEL et al., 2023). Além disso, o maior raio iônico dificulta o armazenamento dos íons Na^+ na grafita, inviabilizando esse anodo para as baterias íon-sódio (KUBOTA et al., 2018; GOIKOLEA et al., 2020). Essas limitações também afetam a estabilidade cíclica e o desempenho em altas taxas de carga e descarga na maioria dos materiais catódicos. Além disso, o amplo uso de baterias de íon-sódio ainda enfrenta desafios relevantes, como menor densidade energética e menor energia específica em relação às baterias de íon-lítio (GABRIEL et al., 2023; XIN et al., 2024).

3.1.2. Baterias de fluxo

Nas baterias de fluxo, as soluções de eletrólitos, separadas em dois reservatórios diferentes, são bombeadas para as células de oxirredução, permitindo flexibilidade no ajuste tanto da capacidade de armazenamento de energia, quanto na potência da bateria de forma independente. A potência do sistema é determinada pelo seu número de células, enquanto a capacidade de armazenamento depende do volume e da concentração do eletrólito nos reservatórios (TOMAZIC, 2015; AMROUCHE et al., 2016; KANDHASAMY et al., 2024). Essa arquitetura permite que a capacidade energética seja ampliada de forma simples, por meio do aumento do volume de eletrólito, sem alterações no conjunto eletroquímico, reduzindo significativamente o custo por energia armazenada (Custo/kWh) e permitindo ganhos de escala significativos (TOMAZIC, 2015).

Do ponto de vista operacional, essas baterias apresentam algumas vantagens técnicas. A energia é armazenada em solução, o que elimina mudanças de fase sólida, como a formação de dendritos, e reduz significativamente o risco de curto-circuitos

[47] O Belírio, apesar de estar localizado próximo ao Lítio na tabela periódica, é menos abundante que este – ver Figura 3 –, não se enquadrando nos prerrequisitos mencionados.

internos. Essas baterias também suportam elevadas taxas de ciclagem, permitindo ciclos profundos de carga e descarga sem perda relevante de capacidade ou redução da vida útil. Além disso, apresentam autodescarga praticamente desprezível, possibilitando o armazenamento de energia por longos períodos (TOMAZIC, 2015; DOETSCH E BURFEIND, 2016). Apesar dessas vantagens, a ampla adoção comercial das baterias de fluxo ainda depende de avanços adicionais em vedação hidráulica, seleção de materiais e redução de custos por meio de ganhos de escala.

3.1.2.1. Baterias de fluxo redox de vanádio (VRFB)

Dentre as tecnologias de baterias de fluxo, as baterias de fluxo redox de vanádio (VRFB) são as mais maduras do ponto de vista tecnológico e comercial. Nessas baterias, ambos os eletrólitos utilizam vanádio dissolvido em ácido sulfúrico, explorando diferentes estados de oxidação do mesmo elemento: V^{2+}/V^{3+} no anodo e V^{4+}/V^{5+} no catodo (TOMAZIC, 2015; DOETSCH E BURNFEIND, 2016, KANDHASAMYET al., 2024).

As VRFB apresentam elevada estabilidade operacional, longa vida útil e boa eficiência energética (DOETSCH E BURFEIND, 2016; KANDHASAMYET al., 2024). Operam tipicamente na faixa de temperatura de 10 °C a 40 °C, limitada pela solubilidade dos íons de vanádio em diferentes estados de oxidação (DOETSCH E BURFEIND, 2016). Apesar de os problemas de precipitação poderem ser sanados por sistemas de controle de temperatura, a solução preferida em aplicações em que não há restrição de espaço ou peso tem sido a redução das concentrações molares do eletrólito, embora essa solução reduza a energia específica da bateria (TOMAZIC, 2015).

Entre os principais desafios das VRFBs, destacam-se o custo elevado do vanádio, a natureza altamente corrosiva do V^{5+} no eletrólito e a necessidade de controle térmico para evitar precipitação (TOMAZIC, 2015). Além disso, sua baixa densidade energética tanto gravitacional, quanto volumétrica, torna essa opção pouco atraente para aplicações móveis (DOETSCH E BURFEIND, 2016). Ainda assim, sua segurança intrínseca, vida útil e ciclagem elevadas as tornam uma alternativa interessante para armazenamento estacionário de larga escala no longo prazo, em que economias de escala tornam-se relevantes (TOMAZIC, 2015; DOESTSCH E BURFEIND; 2016).

3.1.3. Avaliação Geral

A tabela 10 reúne os principais atributos técnicos e econômicos das diferentes tecnologias de baterias, os quais serviram de base para a construção e a caracterização dos cenários analisados.

Tabela 2 - Comparação entre os diferentes tipos de baterias

Tecnologia	Energia Específica (Wh/kg)	Potência Específica (W/kg)	Densidade de Energia (Wh/l)	Eficiência (%)*	Vida Útil (ciclos)	Custo por Potência (EUR/kW)*	Custo por Energia (EUR/kWh)*
Pb-ácido	25-35	75-400	50-80	75-85	500-3000	100-500	100-200
NiMH	75-80	150-460	60-150	60-70	1000-5000	500-1500	400-700
Ni-Cd	30-70	150-350	15-150	60-70	1000-5000	500-1500	400-700
NMC	150-300	180-270	230-740	90-98	2000-2500	150-1000	700-1300
LFP	90-200	180-220	360-460	90-98	2000-8000	150-1000	700-1300
NCA	175-320	670	550-870	90-98	500-1500	150-1000	700-1300
Na-S	180-268	36	300-414	70-80	>4500	2000-3000	300-450
$NaNiCl_2$	100-120	180-245	-	85-95	4500	150-1000	550-750
Na-íon	140-160	100-300	200-300	> 90	500-4000	-	80
VRFB	35-60	75-150	10-25	70-75	>12000	500-1300	100-400

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de NADEEM et al., 2019; MITALI et al., 2022; STEPHAN et al. 2023 e EASE, 2025.

3.2. Pilhas a Combustível

Assim como as baterias, as pilhas a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem energia química em energia elétrica. A principal diferença entre essas tecnologias reside no fato de que, enquanto as baterias armazenam energia internamente, as pilhas a combustível produzem eletricidade de forma contínua a partir do suprimento externo de um combustível e de um agente oxidante (QASEM E ABDULRAHMAN, 2024). Na rota tecnológica selecionada pelo BLUES, a reforma embarcada converte etanol em hidrogênio, o qual é utilizado como combustível para as pilhas. O agente oxidante é, geralmente, o oxigênio (ar).

Com efeito, em virtude dos princípios eletroquímicos comuns às duas rotas tecnológicas, a arquitetura básica de uma célula combustível é similar à das baterias, sendo composta por dois eletrodos (catodo e anodo) separados por um eletrólito. No anodo ocorre a oxidação catalítica do combustível, isto é, o hidrogênio (H_2) é então decomposto em prótons H^+ e elétrons. No catodo, por sua vez, ocorre a redução do

oxidante, em que o oxigênio (O_2) é convertido em íons de Oxigênio ($2O^-$). O eletrólito, por sua vez, permite a passagem dos íons do anodo para o catodo, resultando na formação de água (H_2O), enquanto os elétrons são captados pelo circuito externo, formando uma corrente elétrica (JAMAL ET AL., 2023; QASEM E ABDULRAHMAN, 2024).

As pilhas a combustível são usualmente classificadas de acordo com o tipo de eletrólito empregado. Cada tecnologia apresenta características operacionais específicas, incluindo faixa de temperatura de operação, eficiência, densidade de potência, tempo de partida, além de demandar materiais distintos para eletrólitos e catalisadores (JAMAL et al., 2023; QASEM E ABDULRAHMAN, 2024). Entre as principais tecnologias destacam-se a pilha a combustível de membrana de troca protônica (PCMTP), a pilha a combustível alcalina (PCA), a pilha a combustível de ácido fosfórico (PCAF), a pilha a combustível de carbonato fundido (PCCF) e a pilha a combustível de óxido sólido (PCOS).

3.2.1. Pilha a combustível de membrana de troca protônica (PCMTP)

Embora exista uma diversidade de arquiteturas, atualmente apenas a PCMTP apresenta maturidade tecnológica e potencial comercial significativo para aplicações no setor de transportes. Com efeito, veículos elétricos baseados nesse tipo de pilha já encontraram nichos de mercado, em especial nos Estados Unidos e na Coréia do Sul para veículos leves e na China para caminhões e ônibus (IEA, 2023). Ainda assim, são necessárias melhorias adicionais para que essa tecnologia alcance plena competitividade, especialmente no que diz respeito à redução de custos, ao aumento da durabilidade e à otimização do desempenho eletroquímico (QASEM E ABDULRAHMAN, 2024). Seu funcionamento, no entanto, se diferencia das demais pilhas a combustível, uma vez que o próton é transportado do anodo para o catodo, em vez de o transporte ser efetuado pelo ânion formado (POLLET et al., 2016).

As principais vantagens da PCMTP incluem elevada densidade energética e de potência, rápido tempo de partida e condições de operação relativamente brandas, tanto em termos de temperatura quanto de pressão. Em contrapartida, um de seus principais entraves é o uso de platina suportada em carbono como catalisador em ambos os eletrodos. A platina, além de ser um material crítico, possui elevado custo. Ademais, sua atuação como catalisador apresenta baixa tolerância à presença de monóxido de carbono

(CO) no combustível, o que impõe a necessidade de hidrogênio de alta pureza (INCI et al., 2021; HAMADA et al., 2023).

3.2.2. Pilha a combustível alcalina (PCA)

As pilhas a combustível alcalinas (PCA) são caracterizadas pela utilização de um eletrólito alcalino, sendo este, geralmente, o hidróxido de potássio (KOH). As pilhas PCA também operam em temperaturas relativamente baixas (60-80°C) e apresentam tempos de partida reduzidos, além de elevada eficiência e longa vida útil (FANG et al., 2024). A possibilidade de empregar catalisadores alternativos à platina, como níquel e prata, contribui para a redução do custo material dessa tecnologia. No entanto, sua aplicação no setor de transporte é limitada pela baixa densidade de potência e pela sensibilidade do eletrólito alcalino à presença de dióxido de carbono, cuja reação e formação de carbonato reduz a condutividade iônica da pilha. Essa restrição de pureza torna-se crítica em relação ao oxidante, limitando o uso de ar no sistema (HAMADA et al., 2023; QASEM E ABDULRAHMAN, 2024). Além disso, a formação de água no eletrodo dilui a solução alcalina, demandando um subsistema para readequar o eletrólito (FANG et al. 2024).

3.2.3. Pilhas a combustível de ácido fosfórico (PCAF)

As pilhas a combustível de ácido fosfórico (PCAF), por sua vez, utilizam o ácido fosfórico como eletrólito e operam em temperaturas intermediárias, tipicamente entre 150 °C e 220 °C (EAPEN et al., 2016. FANG et al., 2024). Embora a elevação da temperatura aumente a tolerância do catalisador à presença de CO no combustível, essa característica não elimina a dependência da platina em ambos os eletrodos, mantendo elevados os custos associados ao catalisador. Ademais, a pilha é penalizada pela sua menor eficiência, atribuída à aglomeração das partículas de platina, à corrosão dos suportes de carbono e à perda de eletrólito (EAPEN et al., 2016). Além disso, a aplicação dessas pilhas no setor de transportes é inadequada, sobretudo, devido à baixa densidade de potência e ao longo tempo de partida para que se alcance a temperatura de operação (EAPEN et al., 2016; QASEM E ABDULRAHMAN, 2024). Similarmente às pilhas PCAs, é necessário um subsistema para reconcentrar o ácido fosfórico diluído pela formação de água no catodo (FANG et al., 2024).

3.2.4. Pilha a combustível de óxido sólido (PCOS)

A pilha PCOS desperta interesse para aplicações veiculares em razão de sua elevada densidade de potência, boa densidade energética e capacidade de operar com uma ampla variedade de combustíveis, conferindo, assim, elevada flexibilidade operacional (FANG et al., 2023). Embora dispense o uso de catalisadores à base de platina, essa tecnologia emprega uma séria de materiais críticos. O níquel é utilizado como catalisador, porém ele é suportado por compósitos cerâmico-metálicos que utiliza elementos de terras raras, como ítrio, gadolínio e cério, como condutores iônicos no ânodo e lantânio, cobalto e manganês no cátodo. Apesar das vantagens de performance, as elevadas temperaturas de operação e o longo tempo de partida constituem desafios relevantes para sua adoção no setor de transportes (FARO et al., 2016).

3.2.5. Pilha a combustível de carbonato fundido (PCCF)

Por fim, a pilha a combustível de carbonato fundido (PCCF) utiliza carbonatos fundidos, tipicamente uma mistura de Li_2CO_3/K_2CO_3, como eletrólito. Tanto o ânodo quanto o cátodo apresentam atividade catalítica baseada em níquel. Embora inferiores às das pilhas de óxido sólido, essa tecnologia opera em temperaturas elevadas, o que resulta em um longo tempo de partida (CASSIR et al., 2016). Dessa forma, a PCCF enfrenta desafios similares aos da PCOS, sem oferecer vantagens equivalentes em termos de densidade energética e de potência, o que limita seu potencial para aplicações no setor de transportes (CASSIR et al., 2016; QASEM E ABDULRAHMAN, 2024).

3.2.6. Avaliação Geral

A tabela 11 reúne as principais características e atributos técnicos das diferentes subtecnologias de pilhas a combustível analisadas. Os parâmetros presentes na tabela foram base para a construção e a caracterização dos cenários analisados.

Tabela 3 - Comparação entre diferentes pilhas a combustível.

Pilhas	PCA	PCMTP	PCAF	PCCF	PCOS
Eletrólito	Hidróxido de potássio	Membrana polimérica	Ácido fosfórico	Carbonato fundido	Cerâmica-metálica
Combustível	H_2	H_2	H_2	H_2, CH4, C_3H_8, CO	H_2, CH4, C_3H_8, CO, EtOH

Temperatura (°C)	60-100	50-100	150-220	600-700	600-1000
Eficiência (%)	60-70	40-50	>40	50-60	50-60
Densidade de Potência (kW/m³)	Aprox. 1.0	3.8-6.5	1.1	0.7-1.0	0.8-1.0
Densidade energética (kWh/m³)	-	112 - 770	-	25 - 40	172 - 462
Vida Útil (Horas)	8.000	2.000-3.000	>50.000	7.000-8.000	1.000
Tempo de partida	<1 min	<1 min	-	10 min	60 min

Fonte**:** Adaptado de CASSIR et al., 2016; EAPEN et al., 2016; FANG et al., 2024; QASEM E ABDULRAHMAN, 2024.

3.3. Motores Elétricos

Os veículos elétricos têm sua força motriz baseada na conversão da energia elétrica, armazenada em um sistema de baterias ou fornecida pela pilha a combustível, em energia mecânica, que, em última instância, é transmitida às rodas. Esta conversão se dá nos motores elétricos, responsáveis por garantir uma alta eficiência, torque adequado, controle de velocidade, e, idealmente, reversibilidade, isto é, capacidade de atuar também como geradores para reaproveitar a energia gerada durante a frenagem e armazená-la novamente no sistema de baterias (THAKAR et al., 2019).

Há uma grande variedade de topologia de motores elétricos. No contexto da mobilidade elétrica, os motores elétricos são tipicamente classificados de acordo com seu princípio de funcionamento, composição interna ou forma de controle. Desta forma, destacam-se os seguintes motores: Motores de corrente contínua com escova (BDCM), motores assíncronos por indução (IM), motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM), motores de corrente direta sem escova (BLDC) e motores de relutância comutada (SRM).

3.3.1. Motores de corrente contínua com escovas (BDCM)

Motores de corrente contínua com escovas são os motores mais antigos e fáceis de controlar. Sua arquitetura inclui escovas e comutadores mecânicos que invertem a corrente no rotor, o que demanda manutenção frequente devido ao desgaste das escovas. Além de exigir maior manutenção, o atrito causado pelas escovas torna esse tipo de motor menos eficiente, em especial em operações de alta velocidade, e dificulta o controle de temperatura do rotor. (CAO et al., 2021). Apesar da simplicidade de controle e do torque

elevado em baixas velocidades, os problemas causados pelas escovas tornaram os motores de corrente contínua com escovas obsoleto em veículos elétricos modernos.

3.3.2. Motores assíncrono de indução (IM)

Os motores assíncronos de indução não possuem ímãs, nem escovas. Em linhas gerais, a corrente no rotor é induzida pelo campo magnético do estator, que, por sua vez, é gerado pela corrente elétrica fornecida pela bateria por meio de um inversor de frequência.

Em decorrência dessa indução, ocorre o escorregamento ("Slip"), e, portanto, a assincronia, entre os campos do estator e do rotor, gerando uma penalidade à eficiência dos motores IM pelo efeito Joule, isto é, o efeito resistivo do material do rotor à corrente elétrica gerada (geralmente cobre ou alumínio). Essa penalidade é mais significativa em baixas velocidades, afetando o desempenho deste tipo de motor neste regime. No entanto, ela se torna relativamente menor em altas velocidades, resultando em boas eficiências e tornando os motores IM adequados para o uso em autoestradas (CAO et al., 2021).

Dentre suas vantagens, destaca-se a ausência de ímãs e de escovas, o que lhes garante robustez e baixo custo, sendo um motor de construção simples, baixa manutenção e alta confiabilidade (THAKAR et al., 2019). Outra limitação está associada à sua baixa eficiência no sistema de refrigeração do motor, uma vez que calor é gerado tanto no rotor, quanto no estator (YANG et al., 2015; NUGRAHA et al., 2021).

3.3.3. Motores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSM)

Os motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM) apresentam amplo domínio do mercado de veículos elétricos e veículos híbridos (YANG et al., 2015; CAO et al., 2021). Estes motores possuem ímãs permanentes nos rotores, que podem estar localizados em sua superfície (SPMSM) ou embutidos internamente (IPMSM), mantendo, assim, um campo magnético constante. Os imãs alinham-se ao campo magnético do estator, sincronizando a frequência e a velocidade rotacional, o que acarreta potência constante e alta eficiência em uma ampla faixa de Torque vs. Velocidade.

Além disso, seus pontos de maior eficiência são áreas de baixo torque e baixa velocidade, condizentes com a utilização de veículos elétricos e veículos elétricos híbridos em perímetros urbanos (YANG et al., 2015). Por este motivo, motores PMSM permitem maior economia de combustíveis quando comparados com IM em modelos híbridos (NUGRAHA, 2021).

Para manter seu caráter síncrono, o controle das correntes trifásicas do estator deve ser realizado de forma precisa, garantindo a produção de um campo magnético girante senoidal, sincronizado com a posição angular do rotor. Desta forma, o controle desses motores é comparativamente mais complexo.

Além de serem robustos e de sua alta eficiência, a elevada potência específica dos PMSM resulta em motores de volumes menores, o que é extremamente importante para compensar o alto custo da matéria prima dos ímãs permanentes. Esta característica é, também, relevante dentro de um contexto holístico, em que se abre espaço para os diversos componentes do trem de propulsão. Em contrapartida, a dependência dos ímãs permanentes em elementos de terras raras (ETRs) alimenta preocupações em relação à cadeia de suprimentos destes motores.

3.3.4. Motores de Corrente Contínua Sem Escovas (BLDC)

Os Motores de Corrente Contínua Sem Escovas também lançam mão de ímãs permanentes e são estruturalmente similares aos PMSM. A principal diferença entre eles é o modo de controle e, portanto, de operação. Enquanto os PMSM são controlados com formas de onda de corrente senoidal, os motores BLDC operam com comutação eletrônica trapezoidal, aplicando correntes em blocos retangulares que atuam sobre duas fases por vez. Este arranjo permite uma estimação mais simples da posição do rotor, facilitando seu controle (CAO et al., 2021).

Apesar de mais simples, esse tipo de controle ocasiona em uma maior ondulação do torque (torque ripple), resultando em maior vibração e ruído. Em última instância, este efeito, se não adequadamente mitigado, pode reduzir a vida útil do motor (THAKAR et al., 2019). Não obstante, os BLDCs são caracterizados por possuírem alta eficiência e elevada densidade de potência, além de permitirem um design que favorece a dissipação térmica.

Seu uso, no entanto, está limitado a veículos relacionados à micromobilidade, isto é, segmentos caracterizados por menores requisitos de performance e maior sensibilidade ao preço. Dessa forma, a menor robustez do sistema de controle torna-se menos relevante, ao mesmo tempo em que o motor fornece uma boa relação entre custo-desempenho (COLLINS, 2020).

3.3.5. Motor Síncrono com excitação elétrica (EESM)

Os motores EESM não utilizam ímãs e tem o seu campo magnético gerado pela corrente elétrica que passa pelo rotor e é fornecida por uma fonte externa ao motor. O uso da fonte de excitação externa permite o ajuste dinâmico do campo magnético do rotor, o que possibilita um controle mais preciso do motor e otimiza sua performance e eficiência a uma ampla faixa de operação. Essa flexibilidade de controle também contribui para alcançar alta densidade de potência e reduzir o consumo de energia em condições variáveis de carga. Dessa forma, este tipo de motor é favorecido em veículos de carga (MADEMLIS et al., 2019). Sua limitação, no entanto, está em sua menor maturidade tecnológica.

3.3.6. Motor Síncrono de Relutância Comutada (SRM)

Os motores Síncronos de Relutância Comutada não demandam imãs, tampouco enrolamentos no rotor. Seu princípio de funcionamento baseia-se na relutância magnética variável. Isto é, o rotor se move para minimizar a resistência (relutância) magnética entre ele e o estator. Esse arranjo torna o motor significativamente robusto, simples e altamente tolerante a falhas (THAKAR et al., 2019; CAO et al., 2021). No entanto, os maiores desafios dos motores SEM incluem ruído acustico, vibrações mecânicas e torque ripple, especialmente a baixas velocidades (YANG et al., 2015). Além disso, sua operação exige inversores customizados e uma maior complexidade de cabeamento, devido a sua independência elétrica entre as fases no estator. Tais características podem elevar o custo do sistema, embora o motor em si seja simples e de baixo custo (YANG et al., 2015).

3.3.7. Avaliação Geral

Diferente das baterias e das pilhas a combustível, os motores elétricos não permitem uma comparação objetiva e quantitativa a partir de parâmetros isolados. Analisar os diferentes tipos de motores é uma tarefa árdua, uma vez que suas características variam significativamente em função dos aspectos construtivos, arranjos eletromecânicos e configurações específicas adotadas em cada projeto. Por este motivo, optou-se por realizar uma comparação qualitativa entre os tipos de motor, de maneira a capturar tendências intrínsecas a cada tecnologia, em vez de se restringir a avaliações baseadas em modelos individuais.

Para tanto, procurou-se analisar parâmetros que podem ser distinguidos entre técnicos, operacionais e econômicos. Não raro, estes parâmetros poderiam ser classificados, justificadamente, em diferentes tipologias, dada a influência e interdependência entre si. Ainda assim, buscou-se uma classificação coerente, a fim de facilitar a análise e promover uma visão mais estruturada. Abaixo encontram-se alguns dos parâmetros chave analisados e sua importância.

3.3.7.1. Parâmetros Operacionais

Dentre os parâmetros operacionais, destacam-se:

- Robustez - capacidade de o motor de operar em ambientes adversos e com vibrações;
- Capacidade de sobrecarga – capacidade de suportar cargas acima do nominal por curtos períodos, como em partidas ou picos de cargas;
- Tolerância a falhas – capacidade de operação, mesmo que com falhas parciais;
- Nível de ruído – refere-se ao ruído e à vibração gerada durante a operação do motor;
- Complexidade de controle – Complexidade do sistema de controle sobre velocidade, torque e posição;
- Manutenção térmica – Geração de calor e capacidade de dissipá-lo;
- Torque Ripple –Variações periódicas e indesejadas durante a operação do motor, relativo à suavidade e à precisão durante a operação do motor

Como pode ser observado na Figura 15**Error! Reference source not found.**, o motor IM apresentou a melhor performance geral nos critérios operacionais, destacando-se pela sua baixa complexidade de controle e pelos baixos níveis de Torque Ripple. Suas menores pontuações, no entanto, ocorreram nos quesitos de manutenção térmica e de capacidade de sobrecarga. Na sequência, aparecem os motores com ímãs permanentes (PMSM e BLDC), com uma ligeira vantagem para o PMSM devido à sua melhor tolerância a falhas, o que compensou a sua relativa menor manutenção térmica e maior complexidade de controle.

O EESM, por sua vez, teve sua performance comprometida pela sua baixa robustez e pela sua alta demanda por manutenção térmica. Por fim, os motores SRM tiveram a pior performance dentre os motores analisados, em grande parte devido à sua

complexidade de controle, à sua baixa capacidade de sobrecarga e aos elevados níveis de ruído e de Torque Ripple durante sua operação.

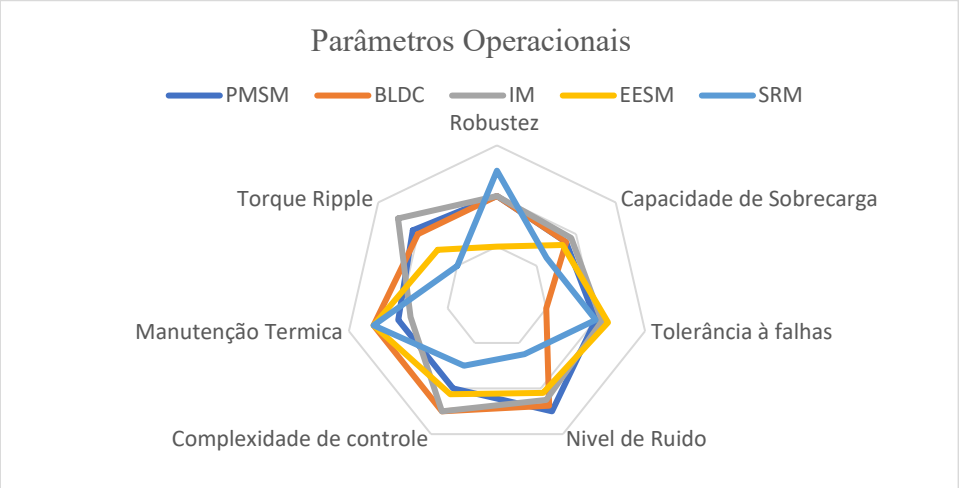


Figura 8 - Parâmetros operacionais dos motores elétricos.

Fonte: Elaboração própria (2025).

3.3.7.2. Parâmetros de Desempenho

Entre os parâmetros de desempenho destacam-se:

- Intensidade de potência – definido como a razão entre potência fornecida e peso do motor.
- Aceleração – definida como taxa de aumento de velocidade;
- Responsividade dinâmica - capacidade de responder às variações de comando do motor;
- Velocidade Máxima – Limite superior de rotação do motor;
- Eficiência em alta e em baixa velocidade – razão entre a energia elétrica fornecida e a energia mecânica produzida pelo motor.

A Figura 16 ilustra que, em relaçao aos parâmetros de performance, os motores com ímas permanentes voltaram a se destacar, desta vez com ligeira vantagem para o motor BLDC. Ambos os motores apresentam excelente desempenho em termos de densidades de potência e eficiência em baixa velocidade, em decorrencia da utilização dos ímas permanentes.

Denota-se um caráter também econômico destes fatores, pois a elevada intensidade de potência resulta em motores de tamanhos menores para executar um mesmo serviço, enquanto altas eficiências – em especial em baixas velocidades, típicas

em perímetros urbanos – resultam em menor consumo de energia. Isso, por sua vez, além de reduzir custos operacionais, permite o uso de baterias menores, diminuindo os custos construtivos para veículos alcancem a mesma autonomia.

Apesar da sua boa eficiência em altas velocidades, os motores IMs foram penalizados pela baixa intensidade de potência e relativa menor eficiência a baixas velocidades. Uma baixa eficiência pode implicar em uma autonomia menor do veículo ou a necessidade de uma bateria maior, o que é indesejado por ser o componente mais caro de um veículo elétrico (Hummel *et al*., 2017). A intensidade por sua vez é essencial tanto em termos de performance, quanto em termos econômicos, dada sua influência no tamanho do Motor.

Os motores EESM e SRM apresentaram os piores desempenhos gerais. Enquanto o primeiro ficou marcado pela sua menor velocidade máxima, o último apresentou baixa intesidade de potência, baixa eficiência e menor responsividade dinâmica.

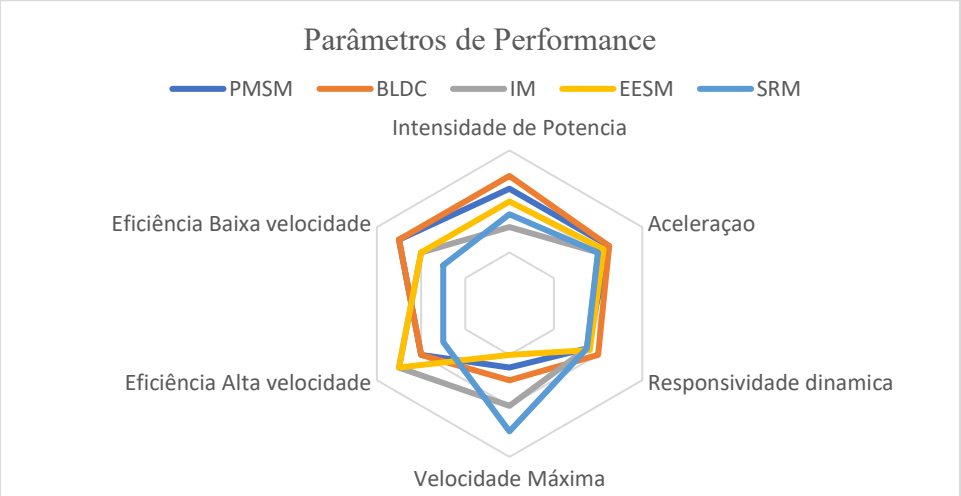


Figura 9 - Parâmetros de performance dos motores elétricos.

Fonte**:** Elaboração própria (2025).

3.3.7.3. Parâmetros Econômicos

Dentre os parâmetros econômicos, destacam-se:

- Custo – custo das matérias primas utilizadas no motor;
- Tamanho – Tamanho comparativo entre os motores para se obter a mesma performance;
- Manutenção – Manutenção esperada ao longo da vida útil de cada motor;
- Maturidade – Maturidade da tecnologia empregada e de seus componentes auxiliares;

- Market Share – Penetração no mercado de cada tipo de motor;
- Vida Útil – vida útil esperada do motor.

Em relação aos parâmetros econômicos, a Figura 17 demonstra uma considerável vantagem dos motores PMSM. Apesar de contraintuitivo, seu elevado custo - atrás apenas dos motores BLDC - é atenuado pelo seu menor tamanho e sua maior vida útil. Outro fator de destaque é o seu maior market share, em parte devido à grande penetração de mercado das montadoras chinesas.

Os motores IM aparecem em seguida, cujo custo competitivo e maturidade elevada o colocaram em posição melhor que os motores BLDC. Os motores EESM e SRM foram penalizados pela menor maturidade e menor participação no mercado, os levando às últimas posições.

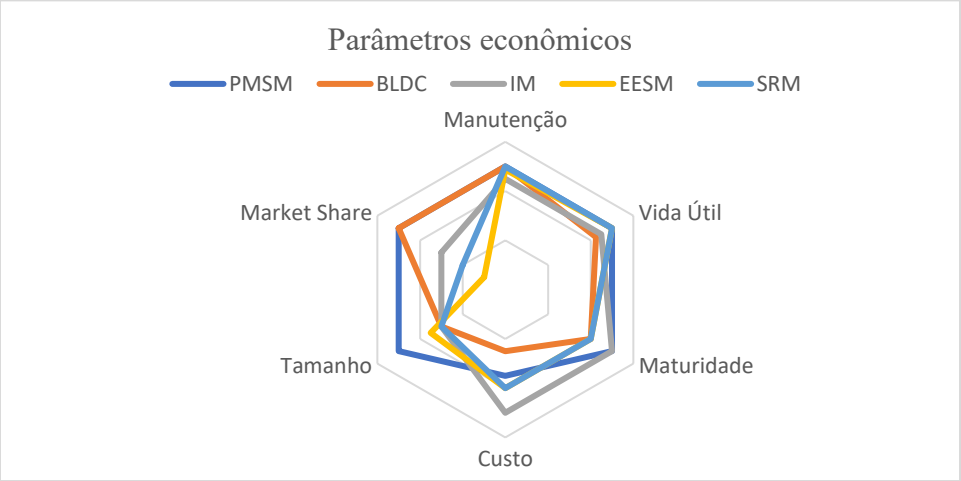


Figura 10 - Parâmetros econômicos dos motores elétricos.

Fonte**:** Elaboração própria (2025).

3.3.7.4. Performance geral

Conforme ilustrado na Figura 18, os motores elétricos do tipo PMSM apresentam desempenho global ligeiramente superior em relação às demais subtecnologias analisadas. Com efeito, essa leitura encontra ressonância com o mercado de veículos elétricos. Os motores PMSM têm sido amplamente adotados pelos fabricantes, consolidando-se como a solução predominante em veículos elétricos, apesar dos desafios associados ao uso de ímãs permanentes (COLLINS, 2020).

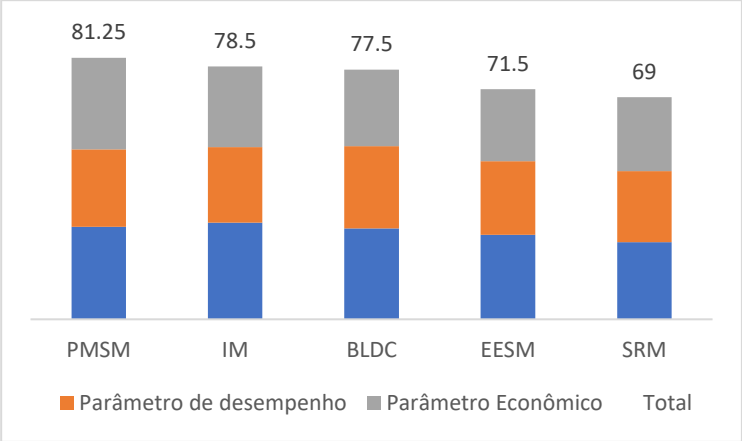


Figura 11 - Pontuação geral dos motores elétricos para escolha da família tecnológica.

Fonte**:** Elaboração própria (2025).

3.4.Geradores de Turbinas Eólicas

Enquanto os veículos elétricos utilizam motores para transformar energia elétrica em energia mecânica, as turbinas eólicas operam de forma inversa: convertem energia mecânica – oriunda dos ventos – em energia elétrica por meio de geradores. Dessa forma, as topologias dos geradores e dos motores elétricos são essencialmente as mesmas. No entanto, apesar da semelhança estrutural, os contextos de aplicação impõem exigências e desafios bastante distintos. Nos geradores eólicos, o foco está em lidar com a variabilidade da velocidade dos ventos e em atender às demandas dinâmicas da rede elétrica, maximizando a geração de energia. Essas condições impõem restrições específicas ao controle, à eficiência e à robustez dos sistemas, configurando um conjunto de desafios técnicos que não se apresentam da mesma forma nos sistemas de propulsão veicular.

Ao longo da evolução tecnológica das turbinas eólicas, os sistemas de controle passaram por profundas transformações. Enquanto as gerações passadas de aerogeradores operavam com velocidades fixas e eram diretamente conectados à rede elétrica, com controle praticamente inexistente, atualmente elas operam em faixas variáveis de velocidade, apresentando maior eficiência e adaptabilidade. O estado da arte, por sua vez, exige não apenas uma ampla faixa de operação para diferentes regimes de vento, mas também múltiplas funcionalidades de controle, essenciais para garantir a estabilidade da rede elétrica e a integridade dos equipamentos.

Essas funcionalidades podem ser classificadas em três categorias principais: os controles básicos, controles específicos e os serviços auxiliares de rede. Os controles

básicos, como reguladores de tensão e corrente e os sistemas de sincronização com a rede, asseguram a operação correta dos conversores de potência. Os controles específicos incluem técnicas como o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), que otimiza a geração de energia em ventos moderados, e a função de suportar falhas (FRT), que mantém a turbina conectada mesmo durante quedas de tensão. Por fim, os serviços auxiliares de rede, como o controle por inclinação (controle droop) – que ajusta a potência ativa conforme variações de frequência – e a inércia sintética, que simula a resposta inercial dos geradores convencionais, tornam-se cada vez mais necessários para garantir a estabilidade e a resiliência de redes com alta penetração de fontes renováveis. Esses controles, no entanto, são extremamente dependentes do tipo de gerador utilizado.

Adiante, as diferentes topologias de geradores serão analisadas à luz das demandas atuais e futuras de controle como instabilidade de voltagem, oscilação de frequência e problemas de instabilidade de sinal. Além disso, serão considerados volume, peso, custo, eficiência, confiabilidade e capacidade de suportar falhas.

3.4.1. Tipos de geradores

As diferentes topologias de geradores dizem respeito à sua construção, forma de controle e sincronicidade com a frequência. Os principais tipos de geradores são geralmente classificados em duas categorias: Geradores de Indução (IG) e Geradores Síncronos (SG). Dentre os mais comuns para aerogeradores de alta capacidade (i.e., superiores a 1 MW), destacam-se os geradores de indução com rotor em gaiola de esquilo (SQIG), geradores de indução duplamente alimentados (DFIG), geradores de indução com rotor bobinado (WRIG), geradores síncronos de ímãs permanentes (PMSG) e geradores síncronos de excitação elétrica (EESG) (YARAMASU et al., 2015).

3.4.2. Geradores por indução com rotor em gaiola de esquilo (SQIG)

Os geradores SQIG são equipamentos simples e robustos. Associados à primeira geração de turbinas eólicas, esses geradores comumente operavam a velocidades fixas, obtendo menor eficiência. Por se tratar de geradores por indução, o escorregamento impossibilita a utilização de muitos polos e, portanto, sua operação a baixas velocidades. Assim, o uso de uma caixa multiplicadora torna-se imperativo. Outros equipamentos ancilares necessários são o banco de capacitores, para compensar a energia reativa gerada

pela rede, e o soft starter, para garantir um acionamento suave do sistema (YARAMASU et al., 2015; SHOURANGIZ-HAGHIGHI et al., 2020).

Apesar deste arranjo garantir simplicidade e baixo investimento inicial, sua inflexibilidade operacional acarreta baixa eficiência, além de a inconstância da velocidade e direção do vento acabar por afetar a estabilidade da rede. Do ponto de vista da vida útil do equipamento, sua rigidez operacional também afeta sua longevidade, uma vez que ventos intensos aumentam o estresse mecânico nas engrenagens e rolamentos. Suas desvantagens inerentes tornaram essa configuração pouco competitiva e, consequentemente, obsoleta para aplicações de larga escala (YARAMASU et al., 2015; DESALEGN et al., 2022). Ainda assim, para pequena escala e operações isoladas do sistema elétrico, esta opção ainda permanece como alternativa (RAJEDRAN, 2022).

3.4.3. Geradores De Indução Com Rotor Bobinado (WRIG)

O gerador WRIG possui rotor bobinado, cuja conexão ao circuito externo ocorre por meio de escovas e anéis coletores. Esse arranjo representa uma desvantagem em relação ao SCIG, devido ao aumento de demanda por manutenção do gerador (CHENG E ZHU, 2014).

Embora tipicamente associado à primeira geração, o WRIG é considerado como uma evolução do gerador SCIG, por permitir velocidades parcialmente variáveis, na ordem de ±10% em relação à velocidade síncrona. Essa maior flexibilidade operacional contribui para o menor desgaste mecânico e maior eficiência da turbina eólica em comparação ao SQIG (YARAMASU et al., 2015). Não obstante, eles também demandam o uso de caixa multiplicadora, capacitores e soft starters e estão, atualmente, defasados tecnologicamente.

3.4.4. Geradores por indução duplamente alimentados (DFIG)

O DFIG é um tipo de gerador de indução, no qual o estator e o rotor são eletricamente conectados. O estator é ligado diretamente à rede elétrica, enquanto o rotor é conectado a um conversor parcial de potência bidirecional (AC-DC-AC), que permite injetar ou consumir potência ativa e reativa, ajustando a frequência do rotor (BEAINY et al., 2016; RAJENDRAN et al., 2022). Essa configuração possibilita a operação da turbina com velocidade parcialmente variável, geralmente em uma faixa de aproximadamente ±30% em relação à velocidade síncrona, favorecendo a flexibilidade operacional e a maximização e da geração de energia elétrica, por meio da estratégia de rastreamento do

ponto de máxima potência (MPPT). Esse sistema também é mais resistente aos distúrbios da rede, embora de maneira limitada frente a severas oscilações de tensão (DESALEGN et al*.,* 2022; RAJENDRAN et al., 2022). Seu arranjo, assim como os exemplos anteriores, demanda uma caixa multiplicadora, geralmente de três estágios, mas já dispensa a necessidade do banco de capacitores e soft starter.

Apesar dos ganhos tecnológicos deste sistema, dentre as desvantagens deste tipo de gerador, destacam-se a demanda por manutenção, relacionada a presença de escovas que conectam o rotor ao conversor, reduzindo sua robustez e confiabilidade para manter o sistema, bem como a sua baixa capacidade de suportar falhas (SHOURANGIZ-HAGHIGHI et al., 2020). Ainda que um gerador DFIG sem escovas tenha sido proposto, as alterações necessárias reduziriam ainda mais a capacidade de suportar falhas, já que o estator estaria diretamente conectado à rede. Como alternativa, utilizam-se equipamentos de proteção e conversores superdimensionados para lidar com as falhas, o que, em contrapartida, aumenta o custo do sistema (SHOURANGIZ-HAGHIGHI *et al*., 2020).

As vantagens de flexibilidade e otimização da produção elétrica, aliada à ausência de ímãs permanentes fez com que os geradores por indução duplamente alimentados despontassem como o principal tipo de gerador em turbinas eólicas onshore. Para aplicações offshore, em que a acessibilidade, a demanda por manutenção e o custo estrutural das turbinas são críticos, o DFIG se mostra pouco atraente. Isto se deve à sua baixa capacidade de suportar falhas e às manutenções regulares associadas às engrenagens e às escovas que conectam os conversores ao rotor. Além disso, a necessidade da caixa multiplicadora aumenta o volume e o peso da nacele, o que implica em maiores custos estruturais da turbina eólica (YARAMASU et al., 2015).

3.4.5. Geradores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSG)

Geradores Síncronos de Ímãs Permanentes (PMSG) mantém a configuração do estator, mas utilizam ímãs permanentes nos rotores, o que dispensa a necessidade de excitação elétrica e de escovas, gerando um campo magnético permanente. Este arranjo permite a utilização de múltiplos polos, permitindo a operação em baixa velocidade rotacional. Isso implica na possibilidade de sistemas com uma caixa multiplicadora reduzida, de apenas um estágio, ou de sistemas sem caixa multiplicadora (direct drive), a depender do volume de ímã permanente utilizado. Em ambos os casos há ganhos de eficiência por menores perdas mecânicas devido à redução ou ausência da caixa

multiplicadora, além de exigirem menor manutenção, produzirem menores níveis de ruído e aumentarem a confiabilidade do sistema (GOUDARZI et al., 2013).

Ademais, esses geradores utilizam conversores totais, que além de garantirem uma maior capacidade de tolerância às falhas, permitem operações da turbina a velocidades totalmente variáveis (YARAMASU et al., 2015; RAJENDRAN et al., 2022). Apesar do maior custo destes conversores, além de flexibilizar a operação das turbinas, eles permitem controle da frequência e tensão da energia gerada e, portanto, uma conexão suave à rede, além de permitirem a compensação de energia reativa, contribuindo para a estabilidade da rede. Por fim, a alta intensidade e densidade de potência dos imãs permanentes permite a utilização de geradores mais compactos e eficientes, que, por sua vez, contribuem para menores custos estruturais.

Apesar das vantagens operacionais do PMSG, preocupações relacionadas à desmagnetização a altas temperaturas e aos pulsos de torque que ocorrem mediante a falhas no conversor, que podem gerar esforços mecânicos elevados na linha de transmissão da turbina, fazem com que seja necessária uma estratégia de controle robusta e, portanto, mais cara (GOUDARZI, 2013).

Essas características tornam o PMSG propício para turbinas eólicas offshore, sendo o tipo mais utilizado para essa aplicação. Apesar de ser uma excelente alternativa para turbinas eólicas onshore, o histórico alto custo dos imãs permanentes e a sua cadeia de valor altamente concentrada na China afastou fabricantes deste tipo de arranjo. Notoriamente, utiliza-se este tipo de modelo em turbinas de potência mais elevada, cujas vantagens do PMSG tornam-se mais proeminentes. Fabricantes chineses, no entanto, como a líder global Goldwind, utilizam sua robusta cadeia de suprimentos para garantir imãs permanentes também em turbinas de menores capacidades e aplicações onshore, tornando-se altamente competitivos nos mercados em que atuam.

3.4.6. Geradores Síncronos Eletricamente Excitados (EESG)

Os EESG possuem estatores trifásicos, semelhante aos outros tipos de geradores síncronos. Sua diferença primordial está no rotor, que é bobinado e excitado por uma corrente contínua, gerando o campo magnético necessário à operação síncrona. Essa configuração permite a utilização de muitos polos e, por conseguinte, sua operação em baixa rotação. Dessa forma, muitas das vantagens vistas no PMSG, referentes a redução ou ausência de caixas multiplicadoras e à utilização de conversores em escala total, são análogas ao EESG (GOUDARZI et al., 2013). No entanto, a ausência de ímãs

permanentes e, portanto, a consequente menor densidade e intensidade de potência resulta em geradores de maior volume e peso, demandando estruturas mais robustas e caras quando em comparação ao PMSG. Outra desvantagem encontra-se na necessidade de escovas e anéis coletores para a alimentação da corrente contínua no rotor, o que implica em uma maior demanda por manutenção e menor confiabilidade do sistema (DESALEGN et al., 2022).

3.4.7. Avaliação geral

Similarmente ao realizado no caso de motores elétricos, uma comparação objetiva e quantitativa entre as diferentes topologias de geradores seria extremamente complexa e de difícil padronização. Isto deve-se às diferentes funções, capacidades e fatores climáticos em que cada instalação se encontra. Dessa forma, optou-se por avaliar os diferentes geradores a partir de uma comparação qualitativa acerca de diferentes parâmetros.

3.4.7.1. Parâmetros operacionais

Dentre os parâmetros operacionais, destacam-se:

- Variação de velocidade – capacidade da turbina operar em diferentes velocidades rotacionais;
- Capacidade de suportar falhas – capacidade da turbina continuar operando e conectada à rede elétrica durante curtos períodos de tempo em que a tensão da rede cai devido a alguma falha;
- MMPT – capacidade do sistema de turbina eólica rastrear e operar no ponto de máxima potência em diferentes velocidades de vento;
- Nível de ruído - refere-se ao ruído e a vibração gerada durante a operação da turbina.

A Figura 19 demonstra as respectivas pontuações das famílias tecnológicas dos geradores PMSG apresentam ampla vantagem em relação aos parâmetros operacionais, seguido pelos geradores EESG que, embora tenha uma pontuação melhor na variação de velocidade, sua baixa densidade de torque foi determinante para a segunda colocação.

Em seguida apareceram os geradores de indução. Como esperado, os geradores DFIG obtiveram melhor pontuação em quase todos os parâmetros em comparação aos

geradores de primeira geração (SCIG e WRIG), com exceção da densidade de torque, em que o WRIG apresentou melhores resultados.

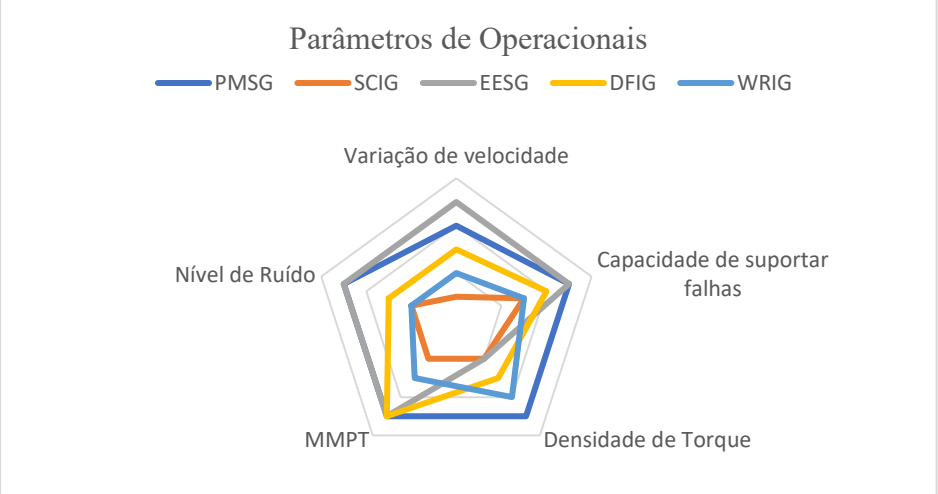


Figura 12 - Parâmetros operacionais das famílias de geradores utilizados em turbinas eólicas.

Fonte**:** Elaboração própria (2025).

3.4.7.2. Parâmetros construtivos

Os parâmetros construtivos dizem respeito à necessidade, complexidade ou tamanho das estruturas do gerador ou de equipamentos ancilares necessários devido às suas limitações. Dentre eles, destacam-se: Caixa multiplicadora; Soft Starters; Compensação de potência reativa; tamanho do gerador; tamanho do conversor.

A Figura 20 demonstra as respectivas pontuações das famílias tecnológicas. Novamente, os geradores síncronos obtiveram melhor pontuação. O tamanho do gerador PMSG foi determinante para sua melhor colocação em relação ao EESG. A demanda pelo Soft Starter e pela caixa multiplicadora prejudicaram os geradores DFIG, enquanto os demais ainda também foram penalizados por demandarem compensação de potência reativa.

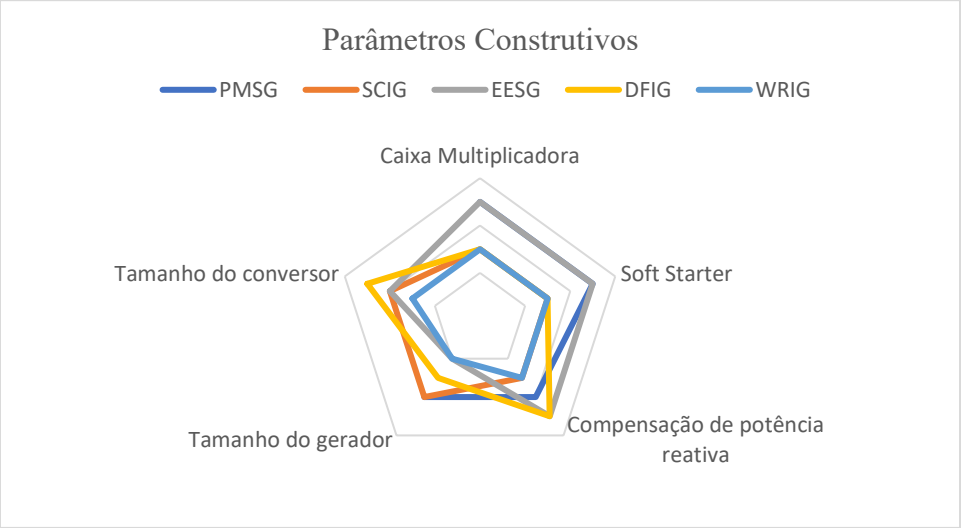


Figura 13 - Parâmetros construtivos das famílias de geradores utilizados em turbinas eólicas

Fonte**:** Elaboração própria (2025).

3.4.7.3. Parâmetros econômicos

Dentre os parâmetros econômicos, destacam-se:

- Custo – Refere-se ao custo do gerador;
- Eficiência – Refere-se à eficiência das turbinas eólicas que utilizam cada topologia;
- Manutenção – Refere-se à demanda por manutenção de cada turbina em decorrência de sua topologia;
- Simplicidade estrutural – A simplicidade da estrutura que da torre que sustenta a turbina eólica;
- Maturidade tecnológica – Trata do grau de desenvolvimento e consolidação da tecnologia empregada em cada topologia;
- Market Share – Refere-se à participação de mercado de cada topologia.

Conforme mostra a Figura 21, sob a ótica dos parâmetros econômicos, o gerador PMSG apresentou o melhor desempenho agregado, impulsionado principalmente por sua elevada eficiência e baixa demanda por manutenção. O DFIG ocupou a segunda posição, destacando-se pelo maior market share entre os analisados, além de apresentar bom equilíbrio entre custo e eficiência. Em seguida, os geradores WRIG e EESG obtiveram pontuações totais equivalentes, embora com características distintas: enquanto o WRIG apresentou se destacou por sua maturidade tecnológica e simplicidade estrutural, o EESG combinou alta eficiência e manutenção reduzida com desvantagens em termos de custo e

participação de mercado. Por fim, o SCIG obteve o menor desempenho global, comprometido por sua baixa eficiência e baixa participação de mercado, apesar de apresentar vantagens relativas em simplicidade estrutural, maturidade tecnológica e custo.

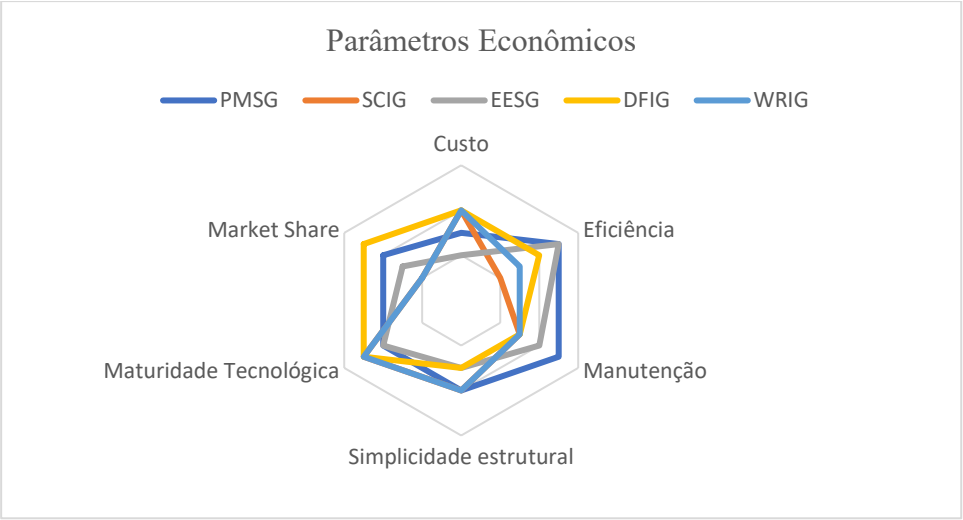


Figura 14 - Parâmetros econômicos das famílias de geradores utilizados em turbinas eólicas.

Fonte**:** Elaboração própria (2025).

3.4.7.4. Performance geral

Conforme ilustra a Figura 22, a análise aponta o Gerador Síncrono de Ímãs Permanentes (PMSG) como a família tecnológica de melhor performance geral para turbinas eólicas, ainda que ele não apresente melhor pontuação em todos os parâmetros. De fato, sua maior desvantagem está relacionada a questões não técnicas, como a concentração da cadeia de valor dos ímãs permanentes na China e a volatilidade dos preços da matéria prima, especialmente os elementos de terras raras (GOUDARZI et al., 2013; YARAMASU et al., 2015; FERNANDEZ, 2017; SHOURANGIZ-HAGHIGHI et al., 2020; RAJENDRAN et al., 2022).

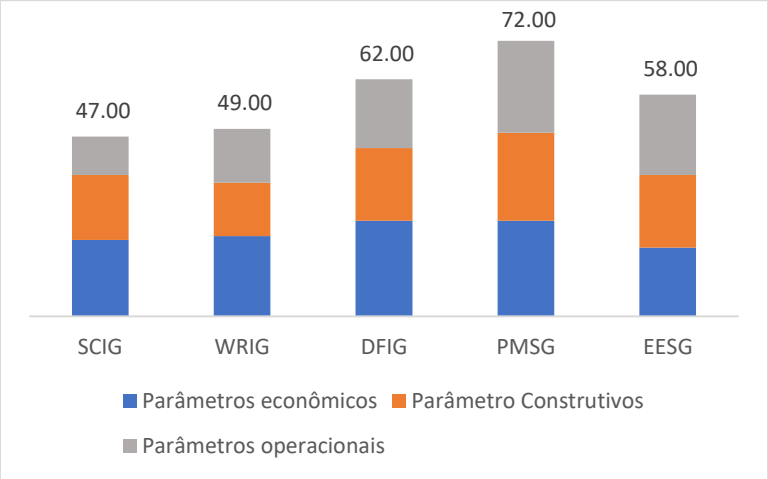


Figura 15 - Pontuação geral dos geradores elétricos para escolha da família tecnológica.

Fonte: Elaboração própria (2025).

3.5. Painéis Fotovoltaicos

A energia solar baseia-se na utilização do efeito fotovoltaico para converter luz solar em energia elétrica. Esta conversão ocorre por meio da absorção de fótons e da consequente excitação de elétrons na camada de valência de semicondutores. Uma vez excitados, os elétrons são deslocados para a camada de condução, gerando, assim, uma corrente elétrica ao serem capturados e direcionados por um circuito externo.

Dessa maneira, as diferentes famílias tecnológicas associadas aos painéis fotovoltaicos derivam dos diferentes materiais semicondutores e de suas respectivas arquiteturas. Tipicamente, as famílias distinguem-se em gerações, como será visto com mais detalhes adiante.

3.5.1. Painéis de 1ª geração – Camadas únicas (Wafer)

Os painéis de 1ª geração utilizam Sílicio mono e multicristalino como semicondutores. Estes cristais apresentam um bandgap[48] indireto, o que implica em coeficientes de absorção óptico menores. Em razão disso, são necessárias espessuras da ordem de 100 e 300 micrômetros para que ocorra a absorção eficiente dos fótons incidentes (SMETS et al., 2016).

Sendo a primeira geração deste tipo de tecnologia, seu nível de maturidade tecnológica (TRL) encontra-se consolidada e comercialmente competitiva, com presença

em larga escala, segundo a IEA (IEA, 2025b). Este tipo de painel representa 97,5% da capacidade instalada global, liderando, também, a capacidade de manufatura, estimada em 485GW, equivalente a 96% da capacidade mundial (FRAUNHOFER INSTITUTE, 2025). Esta escala foi alcançada devido à contínua redução de custos da tecnologia, impulsionada pelo aumento de eficiência dos módulos fotovoltaicos e pela queda no preço do Silício de grau eletrônico.

Como resultado, os painéis de 1ª geração apresentam atualmente o menor custo nivelado de energia (LCOE) entre as tecnologias fotovoltaicas. Não obstante, estudos da NREL apontam que o custo sustentável mínimo – isto é, o mínimo custo em que a tecnologia pode ser comercializada de maneira economicamente viável a longo prazo – deste tipo de tecnologia tende a decrescer ainda mais, alcançando 0,15 USD/W em 2030, comparado com o custo estimado de 0,25 USD/W em 2019 (SMITH et al., 2021).

Do ponto de vista técnico, as perspectivas futuras dos painéis de 1ª geração também são positivas. As eficiências dos módulos comerciais ainda têm espaço para crescer, uma vez que as células solares mais avançadas, obtidas em laboratório, alcançam eficiências superiores a 25% (NREL, 2025). No entanto, nota-se que os avanços nesta frente estão chegando próximo a sua eficiência máxima teórica (limite de Schockley-Queisser*)*. Com isso, a evolução desta tecnologia deve ser direcionada para outros aspectos técnicos relevantes como a redução da taxa de degradação anual e a melhoria do coeficiente de temperatura.

3.5.2. Painéis de 2ª geração – Filmes finos

Os painéis de segunda geração são caracterizados por semicondutores, cujos bandgaps[49] são diretos, permitindo que um filme fino, cuja espessura da camada ativa de absorção encontra-se na ordem de 1-5 micrômetros (SMETS et al., 2016). Uma de suas vantagens, além da redução da intensidade material, é poder utilizar tanto substratos rígidos, como o vidro, quanto substratos flexíveis. Seus exemplos mais conhecidos são o Silício Nanocristalino (nc-Si:H), Silício amorfo (a-Si:H), Telureto de Cádmio (CdTe) e Disseleneto de Cobre-Índio-Gálio (CIGS).

Com a proposta de reduzir os custos de produção e demandar menos material, os filmes finos chegaram a conquistar uma parcela do mercado global significativa no início

[49] É a lacuna de energia em que um elétron não pode estar (entre a "zona" de indução e a "zona" de valência).

da década de 2010. Contudo, os custos decrescentes dos painéis de primeira geração rapidamente deslocaram esta tecnologia que hoje representa apenas 2,5% do mercado (FRAUNHOFER INSTITUTE, 2025). Dentre suas alternativas, o CdTe mostra ainda resiliência em algumas regiões, por exemplo nos Estados Unidos, onde representa 22% do mercado (DoE, 2025).

Enquanto o CdTe apresenta menor custo nivelado de energia dentre a segunda geração, ele ainda é ligeiramente mais caro do que os módulos de primeira geração. Em contrapartida, seu potencial ganho de eficiência é maior, tornando-o uma alternativa promissora no médio e longo prazo. No entanto, a tecnologia CIGS é a que tem mais espaço para crescimento no longo prazo, conforme as projeções de mínimo preço sustentável do NREL (SMITH et al., 2021). Não obstante, a presença dos elementos Índio e Gálio torna a aplicação em larga escala desta tecnologia desafiadora, uma vez que ambos os elementos são obtidos como coprodutos do processamento de outros minerais (VALERO et al., 2021). No caso do CdTe, preocupações acerca da baixa abundância de telúrio e da toxicidade do cádmio também podem representar obstáculos para o amplo emprego desta tecnologia.

3.5.3. Painéis de 3ª geração

Os painéis de terceira geração, diferentemente das gerações anteriores, são mais abrangentes em termos tecnológicos, podendo ser constituídos por diferentes materiais. Seu principal conceito está relacionado ao fato de aliarem baixos custos de produção com altas eficiências – em alguns casos superando os limites teóricos de Schockley Queisser por utilizar materiais de diferentes bandgaps na mesma célula (SHAH et al., 2023). Não obstante, muitas destas tecnologias ainda estão em estágio de desenvolvimento e não alcançaram status comercial.

3.5.3.1. Células multijunções III-V

Apesar de as células multijunção baseadas em compostos III-V serem caracterizadas por apresentar bandgaps diretos, o que permite a absorção eficiente da luz em camadas de fina espessura, a utilização de camadas de Germânio (Ge) ou Arsenieto de Gálio (GaAs) impede que sejam classificadas como células de segunda geração (SMETS et al., 2016).

Sua principal distinção tecnológica está na utilização de múltiplos materiais semicondutores com diferentes bandgaps, organizados em série. Isso permite que cada

subcélula absorva uma faixa distinta do espectro solar, possibilitando a superação do limite teórico de eficiência de células de junção. Essa abordagem é favorecida para os elementos das colunas III e V da tabela periódica (como Ga, Al, In, As, P), cujas estruturas de cristais possuem constantes de rede semelhantes, facilitando a formação de estruturas multijunção com boa qualidade cristalina e baixa densidade de defeitos. Exemplos típicos incluem junções duplas (GaAs; InP) e triplas (GaInAs).

O nível de maturidade tecnológica dessas células é elevado, estando disponível comercialmente (IEA, 2025b). No entanto, seus altos custos de produção, decorrentes da complexidade de fabricação, uso de materiais críticos e necessidade de substratos de alta pureza, limitam sua aplicação a nichos específicos, como a indústria aeroespacial, onde a eficiência por área e o peso são fatores críticos.

3.5.3.2. Células Fotovoltaicas Orgânicas (OPV) e Células sensibilizadas por corantes (DSSC)

As células fotovoltaicas orgânicas (OPVs) e as células sensibilizadas por corantes (DSSCs) utilizam compostos orgânicos como semicondutores ativos. Embora os mecanismos de conversão fotovoltaica sejam distintos entre si, ambas enfrentam desafios semelhantes: baixo nível de maturidade tecnológica, com aplicações ainda restritas a protótipos em fase de pesquisa, eficiência limitada e baixa estabilidade ao longo do tempo (IEA, 2025b).

Atualmente os OPVs apresentam uma eficiência de 14,5% em escala laboratorial, enquanto os DSSCs chegam a 11% (NREL, 2025). Acredita-se que o baixo custo de produção e a flexibilidade estrutural dessas tecnologias possam, no futuro, compensar suas limitações de estabilidade e eficiência, especialmente em aplicações específicas como dispositivos portáteis, fachadas integradas ou ambientes internos.

3.5.3.3. Células Perovskite

As células solares de perovskite utilizam haletos de metais com estrutura perovskite como camada ativa. Apesar de enfrentarem desafios comuns às células orgânicas – como baixa estabilidade química e degradação acelerada –, sua eficiência em escala laboratorial já alcançou cerca de 27%, colocando-as entre as mais promissoras no campo das tecnologias fotovoltaicas emergentes (NREL, 2025). O principal entrave técnico atualmente é sua instabilidade operacional, com perdas anuais de eficiência que

podem superar 10%, o que ainda impede sua competitividade comercial. No entanto, diversos estudos apontam para o potencial de integração com o silício monocristalino em configurações tandem Perovskite/Si – uma configuração que combina uma ou mais células, uma em cima de outra – visando unir a alta eficiência da célula perovskite com a estabilidade do silício monocristalino. Para que essa abordagem se torne viável, será necessário estabilizar a camada de perovskite de forma robusta e durável (DOE, 2025b).

3.5.4. Avaliação Geral

A Tabela 12 consolida os principais atributos e especificações técnicas das subtecnologias de células fotovoltaicas consideradas neste estudo. Os parâmetros ali apresentados fundamentaram a elaboração e a definição dos cenários analisados.

Tabela 4 - Comparação dos diferentes tipos de células solares. Nota: CTP – Coeficiente de Temperatura e Potência; MSP – Mínimo preço sustentável; LCOE – Custo nivelado de energia

Parâmetro	Silício cristalino		Filmes Finos			Terceira geração			Tandem	III-V Mult.
	m-Si (PERC)	p-Si	CIGS	CdTe	a-Si	DSSC	OSC	Perovskite	Peovskite/Si	3+ Junctions
Eficiência Célula	26%	24%	24%	23%	14%	13%	19%	27%	35%	39%
Eficiência Módulo	25%	20%	20%	20%	12%	11%	15%	21%	-	35%
Eficiência Comercial	21%	-	14%	18%	-	-	-	13%	-	
CTP (%/°C)	-0.35	-	-0.40	-0.30	-0.13	-	-	-0.20	-	-0.20
Taxa de degradação(%/ano)	-0.50	-	-0.45	-0.45	-	-	-	-10.00	-	-0.40
LCOE (Cents/kWh)	4.4	-	5.6	4.6	-	-	-	400	-	366
MSP (USD /Wdc)*	0.25	-	0.48	0.28	-	-	-	0.38	0.31	7700
Maturidade Tecnológica (TRL)	10		9			5-6	5-6	5-6	-	9
Market Share Atual	97.50%		2.50%		-	-	-	-	-	-
Disponibilidade/Escalabilidade	485GW	4GW	2GW	12GW	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaboração própria baseado em dados de SMITH et al., 2021; FRANUNHOFER INSTITUTE, 2025; NREL, 2025; IEA, 2025; ITRPV, 2025.

4. Metodologia

Este capítulo descreve a estratégia metodológica adotada para estimar a demanda de materiais críticos necessária ao cumprimento da segunda NDC brasileira. Para tanto, utilizou-se um cenário condizente com a NDC brasileira no modelo BLUES, cujas premissas e principais restrições deste cenário encontram-se detalhadas na seção 5.1. Paralelamente, a partir da revisão bibliográfica realizada na seção anterior, estabeleceram-se três subcenários de penetração tecnológica para o tratamento das saídas do BLUES, conforme descrito na seção 5.2. A essa etapa de pós-processamento, compete a determinação das participações de mercado das subtecnologias selecionadas em cada cenário, culminando nas suas respectivas adições de capacidade instalada ou de estoque ao longo do período analisado. Na etapa subsequente, estimou-se a demanda de materiais críticos de cada cenário, por meio de relações de intensidade material dos conversores energéticos encontradas na literatura científica (disponíveis no Anexo 3).

O capítulo estabelece, portanto, um percurso metodológico que parte da caracterização das tecnologias e culmina na quantificação de seus materiais diretamente incorporados, isto é, os insumos presentes nos conversores energéticos após sua manufatura, o que significa que eventuais perdas do processo de produção não estão contempladas na análise. Em outras palavras, pode-se assumir que a demanda material calculada se refere à demanda material líquida utilizada em cada um dos conversores avaliados.

Em relação a escolha dos materiais críticos avaliados, foi observado no Capítulo 3 que não há uma lista única ou consensual na literatura. Diferentes listas refletem abordagens distintas, que variam conforme os objetivos institucionais e os critérios analíticos adotados. Não raro, os critérios de criticidade incorporam dimensões que extrapolam o escopo da transição energética, como aspectos de defesa, segurança nacional, relevância econômica, além de outros fatores considerados estratégicos.

No caso brasileiro, não há uma lista de materiais críticos, apenas de materiais estratégicos. Dentre os critérios utilizados pelo governo brasileiro, o que mais se aproxima ao tema da transição energética são os materiais que possuem importância pela aplicação em produtos e processos de alta tecnologia. No entanto, este ainda é muito abrangente e engloba elementos pouco relevantes e aderentes ao tema, além de negligenciar materiais essenciais para tecnologias de baixo carbono. Diante dessa limitação, optou-se por utilizar

a lista presente no estudo "Critical Minerals Data Explorer" (IEA, 2025) da Agência Internacional de Energia[50], devido ao seu enfoque explícito nas tecnologias de baixo carbono e sua abordagem desvinculada a perspectivas nacionais.

Por fim, faz-se necessária a definição do volume de controle da análise. A estimativa da demanda de materiais críticos deste trabalho não abrange todos os componentes das tecnologias consideradas, restringindo-se ao seu núcleo funcional: os conversores energéticos. Embora componentes estruturais e sistemas auxiliares também contribuam para o desempenho tecnológico, os conversores são fundamentais para sua caracterização, além de concentrarem materiais de maior especificidade funcional e menor possibilidade de substituição, sendo, portanto, mais representativos da criticidade das tecnologias avaliadas.

4.1. Cenário utilizado do modelo BLUES

Para este trabalho, a equipe de modelagem do laboratório Cenergia elaborou um cenário alinhado à 2ª NDC brasileira e com os planos setoriais presentes nela. A tabela 1 sintetiza as premissas gerais consideradas, enquanto as tabelas 2 e 3 apresentam as hipóteses adotadas para os setores energético e de uso do solo nesse cenário, respectivamente. Os resultados correspondentes estão apresentados no Capítulo 6.

Tabela 5 - Premissas gerais adotadas para o cenário da segunda NDC brasileira

Premissas adotadas	Descrição
Premissas econômicas e demográficas	• Crescimento econômico e populacional baseados no SSP2[51]
Cumprimento das metas da NDC	• 2025 - 1,32 Gt CO_2eq • 2030 - 1, 2 Gt CO_2eq

[50] Nesta lista estão incluídos: Boro, Cádmio, Cromo, Cobre, Cobalto, Gálio, Germânio, Grafita, Háfnio, índio, Irídio, Chumbo, Lítio, Magnésio, Molibdênio, Níquel, Nióbio, Platina, Paládio, Ródio, Rutênio, Ósmio, Selênio, Silício, Prata, Tântalo, Telúrio, Estanho, Titânio, Tungstênio, Vanádio e Zinco, Zircônio, Arsênio, Neodímio, Disprósio, Praseodímio, Térbio, Ítrio, Lantânio.

[51] Os Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) são cenários narrativos que descrevem possíveis trajetórias de desenvolvimento socioeconômico global, utilizados para analisar desafios de mitigação e adaptação às mudanças climáticas de forma consistente entre modelos. O SSP2, conhecido como "middle of the road", representa uma trajetória intermediária, na qual tendências históricas em demografia, crescimento econômico, urbanização, desigualdade e progresso tecnológico continuam sem grandes rupturas, resultando em desafios moderados tanto para a mitigação quanto para a adaptação climática, com avanços graduais, porém insuficientes, em sustentabilidade e cooperação internacional. Para mais detalhes, ver RIHAI et al. (2017) e BAPTISTA (2020).

	• 2035 - entre 0.85 e 1.05 Gt CO_2eq
Objetivo de longo prazo	• Neutralidade climatica (GEE) em 2050

Tabela 6 - Principais premissas adotadas para o setor energético brasileiro no cenário da segunda NDC brasileira

Premissas adotadas	Descrição
Energia Nuclear	• Entrada de Angra III em 2030
Decreto 11.042 da lei 14.182 de 2021	• 8GW de Usinas Termoelétrica a Gás Natural a partir de 2025 • 2GW de pequenas Centrais Hidrelétricas a partir de 2025
Diesel B	• Diesel B15 a partir de 2025
Gasolina C	• Gasolina com 27.5% vol de etanol
Refinaria	• RNEST com capacidade de processamento de 230k bpd em 2030
Biocombustíveis avançados	• Somente a partir de 2030 com plantas de pequena escala
Infraestrutura logística	• Melhoria da pavimentação de estradas
Setor elétrico	• Entrada de Capacidade já contratada

Tabela 7 - Principais premissas adotadas para o uso do solo no cenário da segunda NDC brasileira.

Premissas adotadas	Descrição
Plano ABC+	• Cumprimento do Plano de Agricultura de Baixo Carbono
PLANAVEG	• Implementação de 12 Mha de vegetação nativa até 2035 • Desmatamento ilegal zero a partir de 2030 • Desmatamento legal endógeno ao modelo pós 2030 • Limite de recomposição florestal até 2050 de 22,1 Mha • Reflorestamento anual máximo de 1,2Mha/ano (floresta+savana)

4.2. Premissas dos subcenários e da seleção das subtecnologias

A partir da revisão da literatura técnico-científica realizada no Capítulo 4, com o objetivo de caracterizar suas diferentes variações subtecnológicas.elaborou-se três cenários de substituição tecnológica: Business as Usual (BAU), Disrupção Tecnológica (DT) e Restrição Material (RM).

No cenário BAU, as tecnologias incumbentes seguem como mais competitivas e, portanto, mais propensas a vencer a corrida tecnológica. Essa maior competitividade pode estar atrelada a vantagens técnicas, a cadeias produtivas já consolidadas, a ausência de custos de transição ou à falta de avanço técnico nas tecnologias contestadoras. Tecnologias emergentes demoram a atingir maturidade tecnológica comercial e apresentam alcance limitado, restritas a nichos de mercado.

4.2.1. Cenário Business as Usual

O cenário Business as Usual (BAU) assume a continuidade das tendências tecnológicas atualmente observadas, com evolução incremental baseada em ganhos de escala, redução de custos e consolidação das cadeias produtivas existentes. Nesse contexto, não se pressupõem rupturas tecnológicas significativas nem restrições severas associadas à oferta de materiais.

4.2.1.1. Baterias veiculares e estacionárias - BAU

No cenário BAU, assume-se a continuidade das trajetórias tecnológicas atualmente observadas no mercado de baterias, caracterizadas pela predominância das tecnologias convencionais de íon-lítio e, dentre estas, pela difusão gradual de químicas de menor custo (MCKINSEY, 2024; TAKANASHI, 2025; IEA, 2025). Nesse contexto, observa-se uma expansão consistente das baterias LFP em todas as classes de veículos, impulsionada por sua elevada competitividade econômica e longa vida útil. Sua evolução incremental, representada pelas baterias LMFP, apresenta um processo mais lento de maturação tecnológica e de viabilidade econômica. Ainda assim, seu desempenho superior permite a substituição de parte das aplicações mais exigentes em termos de autonomia e densidade energética, anteriormente atendidas por baterias LFP. De forma semelhante, as baterias de íon-sódio alcançam maturidade tecnológica apenas no final do período analisado, passando a ocupar uma parcela marginal do mercado, sobretudo em

veículos de pequeno porte, nos quais o critério de custo se sobrepõe aos requisitos de desempenho.

Embora percam participação relativa, as baterias da família NMC permanecem relevantes, especialmente nos veículos leves de maior valor agregado, em função de sua elevada densidade energética, da demanda por maiores autonomias nesse segmento e da menor sensibilidade ao preço por parte de seus consumidores. Adicionalmente, a trajetória tecnológica dessa família segue marcada pelo aumento do teor de níquel em detrimento do cobalto. Essa tendência decorre do objetivo de reduzir custos, mitigar riscos associados ao suprimento de matérias-primas críticas e aprimorar o desempenho eletroquímico das baterias. Essa evolução pode ser observarda em maior detalhe na Figura 23.

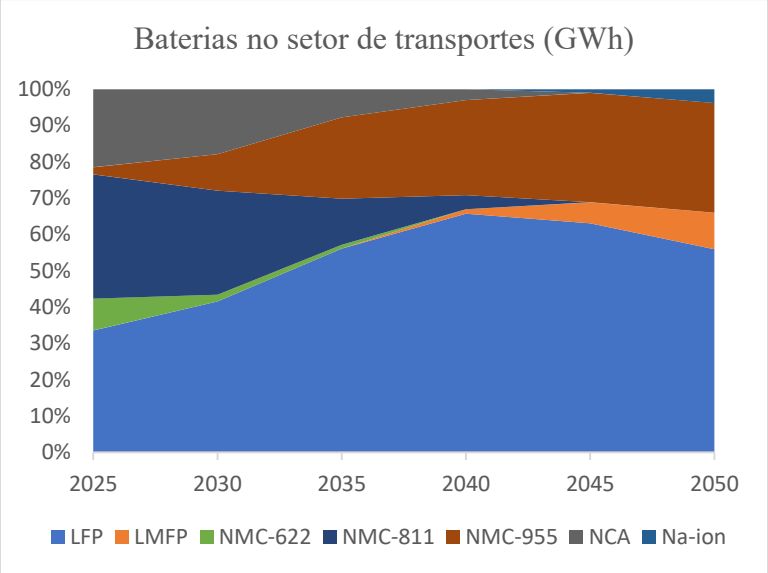


Figura 16 - Evolução da participação do mercado das baterias no setor de transporte - Cenário BAU.

Fonte: Elaboração Própria.

Já no segmento de armazenamento estacionário, em consonância com a tendência global, as baterias LFP consolidam sua posição dominante nas novas instalações eletroquímicas (NICHOLS, 2024). Esse domínio decorre do fato de que, para essas aplicações, critérios como vida útil e custo são mais determinantes do que a densidade energética ou a energia específica. Analogamente, as baterias de chumbo-ácido se beneficiam, no início do período, de sua relação custo-benefício e da existência de uma cadeia produtiva nacional já estabelecida. Contudo, como demonstra a figura 24, essa participação rapidamente diminui à medida que tecnologias mais avançadas e competitivas se difundem. As baterias NMC, por sua vez, apresentam uma participação

progressivamente decrescente, tornando-se residuais ao longo do horizonte analisado. As baterias emergentes, LMFP e de íon-sódio, apresentam um processo mais lento de amadurecimento tecnológico e, ao final do período, registram participação crescente, ainda que pouco expressiva.

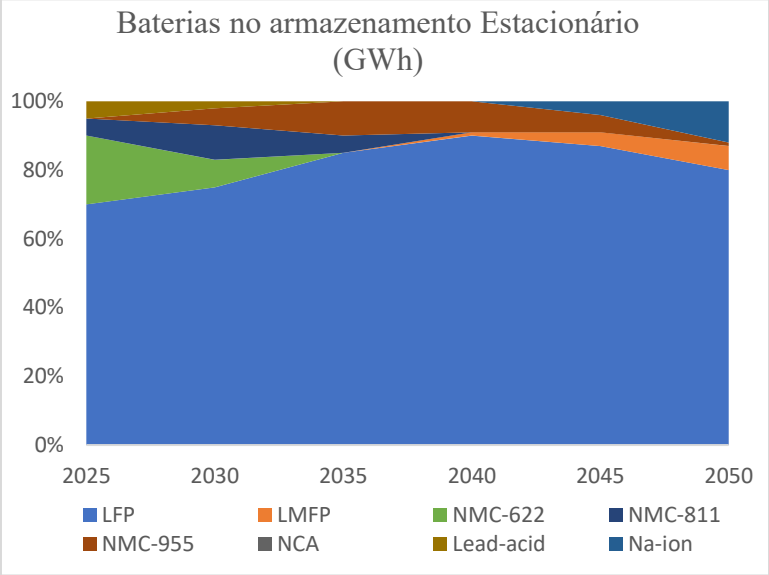


Figura 17 - Evolução da participação do mercado das baterias para o armazenamento estacionário de energia - Cenário BAU.

Fonte: Elaboração própria.

4.2.1.2. Pilhas a combustível - BAU

Nos três cenários analisados, a avaliação das diferentes arquiteturas de pilhas a combustível indica que, no período entre 2025 e 2050, apenas a pilha a combustível de membrana de troca protônica (PCMTP) apresenta viabilidade para aplicação no setor de transportes. Essa conclusão decorre de sua elevada densidade de potência, rápido tempo de partida e maior grau de maturidade tecnológica em aplicações no setor de transportes, atributos essenciais para atender às exigências operacionais desse setor.

As demais tecnologias, embora tecnicamente funcionais, apresentam limitações específicas que comprometem sua adoção em veículos. No caso das pilhas a combustível alcalinas, a inviabilidade está associada à sensibilidade do eletrólito alcalino ao dióxido de carbono presente no ar, o que restringe o uso do ar como oxidante e impõe elevada complexidade ao sistema. As pilhas a combustível de ácido fosfórico, por sua vez, mostram-se tecnicamente inferiores às PCMTP em razão de sua menor densidade de potência e menor eficiência. Além disso, para atingir a temperatura de operação, são

necessários longos tempo de partida, característica incompatível com a dinâmica do setor de transporte terrestre.

Analogamente, as pilhas a combustível de óxido sólido, são limitadas principalmente pela elevada temperatura de operação, que resulta em tempos de partida excessivos e impõe desafios adicionais de integração e segurança em sistemas veiculares. Por fim, as pilhas a combustível de carbonato fundido são penalizadas devido à baixa densidade de potência, fator que, aliado à operação em altas temperaturas, restringe seu potencial de aplicação em veículos. Dessa forma, em todos os cenários considerados, a PCMTP é adotada como a única tecnologia de pilha a combustível viável para o setor de transportes.

4.2.1.3. Motores elétricos - BAU

Atualmente, os motores PMSM dominam o mercado de veículos elétricos, representando 85% das vendas de veículos elétricos em 2023, seguidos pelos motores de indução (IM) com 12% e os motores de relutância comutada, com 3% (IDTECHEX, 2025). Esse domínio é explicado por sua excelente performance em perímetros urbanos, onde se concentra a maior parte do uso de veículos elétricos no caso brasileiro. Dessa forma, no cenário BAU, assume-se a continuidade das tendências atuais do mercado de veículos elétricos, levando a uma breve ampliação desse domínio até 2050, subindo de 85% para 90%, como ilustrado na Figura 25. Ainda assim, com a maturação do setor e a diversificação das demandas, é esperado que outras tecnologias continuem a ter participação, ainda que reduzida, no mercado, com destaque para os motores de indução (IM).

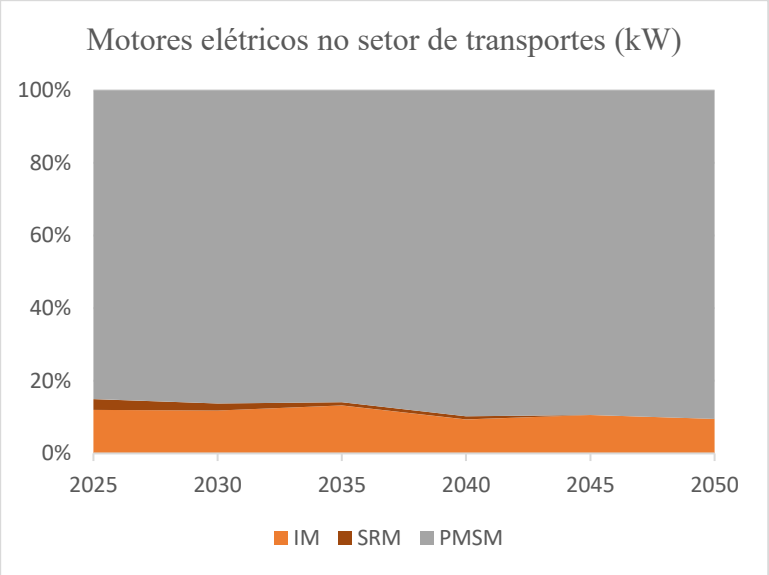


Figura 18 - Evolução da participação de mercado de motores elétricos no setor de transporte no período de 2025 a 2050 - Cenário BAU.

Fonte: Elaboração própria

Tal cenário reflete o domínio dos fabricantes chineses no mercado brasileiro de veículos elétricos, que não enfrentam desafios para acesso aos elementos de terras raras para a manufatura dos ímãs permanentes. Ademais, diversos outros fabricantes de grande presença no mercado brasileiro adotam motores PMSM para seu veículo, como a americana General Motors, as alemãs Volkswagen, BMW e Mercedes e as japonesas Honda e Mitsubishi, enquanto os motores de indução (IM) são adotados em menor quantidade por montadoras associadas a veículos de luxo, como Tesla e Audi e os motores de relutância síncrona comutada foram adotados apenas por um fabricante relevante no mercado brasileiro, a Renault (COLLINS, 2020).

Importa ressaltar que os motores de corrente contínua sem escovas (BLDC), apesar de sua pontuação elevada na análise realizada, apresentam restrições de desempenho que limitam sua difusão em veículos elétricos de maior porte, com destaque para sua baixa tolerância a falhas. Com efeito, sua aplicação permanece concentrada em nichos específicos, como microveículos, bicicletas e motocicletas elétricas (COLLINS, 2020), os quais não foram indicados pelo modelo BLUES.

4.2.1.4. Geradores eólicos - BAU

De acordo com a análise das subtecnologias, os geradores DFIG obtiveram melhor desempenho nos parâmetros econômicos, justificando a sua preferência entre fabricantes de turbinas eólicas até o momento. Com efeito, ao analisar o portfólio de produtos das

principais fabricantes do Brasil até 2022 (EPOWERBAY, 2022), nota-se uma predominância pelos Geradores de Indução Duplamente Alimentados para aplicações onshore. Considerando estes portfolios como base, é razoável inferir que as instalações dos últimos anos, cuja capacidade nominal média aumentou de 3,9 MW por turbina para 4,8 MW entre 2020 e 2022 (EPE, 2023), tenham sido majoritariamente de turbinas eólicas equipadas com geradores DFIG.

Assim, o cenário BAU assume a manutenção da tendência atual de predomínio dos geradores DFIG em aplicações Onshore. No entanto, a entrada da fabricante chinesa Goldwind no Brasil em 2024 (GOLDWIND, 2024) tende a alterar essa dinâmica no médio prazo, aumentando gradativamente a penetração de turbinas com PMSG no mercado, em especial as que dispensam caixa multiplicadora (PMSG DD). A tendência de utilização de rotores de diâmetros cada vez maiores e de torres cada vez mais altas (EPE, 2023), para capturar ventos mais intensos e constantes, deve favorecer ainda mais esse tipo de turbinas no médio e longo prazo, uma vez que as vantagens competitivas do PSMG se tornam ainda mais preponderantes com o aumento de escala. A evolução da participação de mercado dos tipos de geradores pode ser observada na Figura 26.

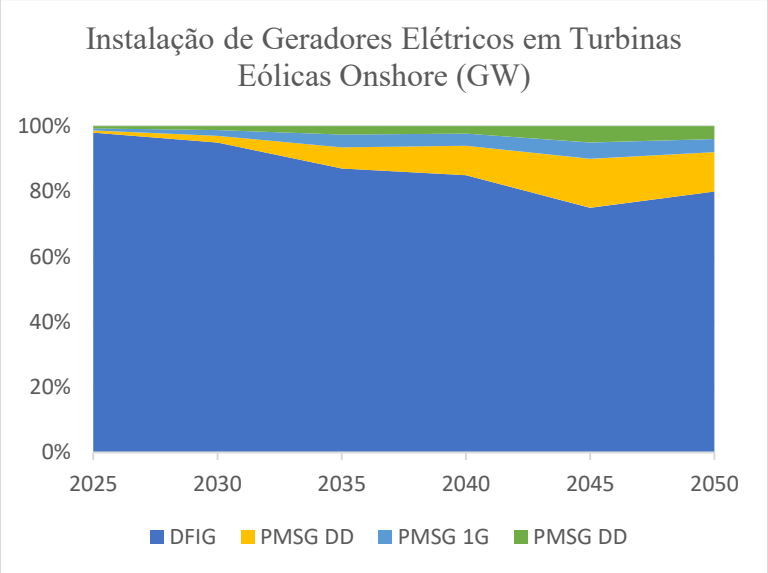


Figura 19 - Evolução da participação de geradores elétricos no setor Eólico Onshore no período de 2025 a 2050 - Cenário BAU.

Fonte: Elaboração própria

4.2.1.5. Energia solar - BAU

No cenário BAU, o amplo domínio dos módulos fotovoltaicos de primeira geração, baseados em silício monocristalino, tende a permanecer preponderante no curto, médio e longo prazo, sustentado por sua maturidade tecnológica, escala de produção consolidada e custo nivelado de energia (LCOE) competitivo. No entanto, à medida que os módulos de silício monocristalino se aproximam de seus limites teóricos de eficiência, abre-se espaço para uma ampliação gradual da participação das tecnologias de filmes finos no mercado nacional. Esse movimento é reforçado pela consolidação da capacidade produtiva dos módulos de Telureto de Cádmio (CdTe), especialmente nos Estados Unidos, onde a base instalada dessa tecnologia já alcançou escala relevante, contribuindo para sua maior competitividade e difusão no mercado fotovoltaico.

Para geração distribuída, apesar da manutenção do silício cristalino, acredita-se em um avanço mais significativo dos painéis de filmes finos, em um primeiro momento com CdTe e, posteriormente, com o crescimento da participação dos painéis de CIGS. Essa tendência decorre da vantagem dos filmes finos em aplicações descentralizadas, devido a sua capacidade de formar painéis solares flexíveis e, portanto, de menor custo estrutural e de instalação.

Apesar do crescente interesse em células tandem perovskite/Si, o cenário BAU parte da premissa de que a tecnologia não alcance maturidade e confiabilidade suficientes para uma entrada significativa no mercado até 2050 dado estágio atual de desenvolvimento. Da mesma forma, as células multijunção baseadas em compostos III-V, embora apresentem eficiências superiores e bom desempenho sob condições extremas, devem continuar restritas a nichos de alto valor agregado, como a indústria aeroespacial. Seu custo de fabricação elevado, devido ao uso de materiais escassos e técnicas complexas de deposição, deverá seguir como principal entrave para sua adoção em larga escala no setor fotovoltaico convencional. A distribuição das subtecnologias ao longo do tempo em ambas as aplicações pode ser observada na Figura 27.

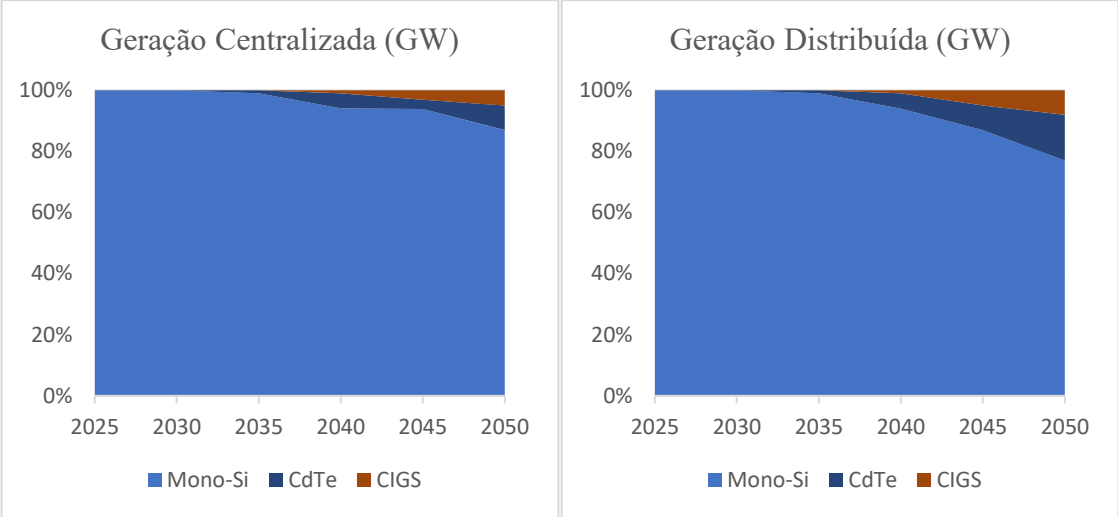


Figura 20 - Evolução da participação de das subtecnologias de geração solar centralizada e descentralizada no período de 2025 a 2050 - Cenário BAU.

Fonte: Elaboração Própria

4.2.2. Cenário de Disrupção Tecnológica (DT)

No cenário de disrupção tecnológica, a substituição tecnológica ocorre naturalmente, à medida que avanços técnicos e de escala permitem que tecnologias já estabelecidas, mas atualmente sem espaço, aumentem sua participação de mercado. Similarmente, o rápido avanço tecnológico permite que tecnologias emergentes apresentem uma introdução mais rápida e agressiva no mercado, rapidamente deslocando as tecnologias incumbentes e ocupando espaços relevantes do mercado brasileiro. Esse cenário é suportado pelo conceito schumpeteriano de destruição criativa, em que fortes incentivos à inovação levam à rápida substituição tecnológica. Essa substituição, por sua vez, é motivada pela redução de custos e por ganhos de eficiência e de desempenho. Dessa forma, o cenário DT pressupõe avanços acelerados em desempenho técnico, eficiência e confiabilidade, com a escolha tecnológica sendo guiada prioritariamente por critérios de performance, mesmo diante de maiores custos ou riscos associados às cadeias de suprimento.

4.2.2.1. Baterias - DT

No cenário DT, a seleção das tecnologias de armazenamento é orientada prioritariamente pela maximização do desempenho técnico, com ênfase na densidade de energia e na potência específica, em busca de maior autonomia e maior capacidade de aceleração. Nesse contexto, baterias NMC e NCA ampliam sua participação de mercado,

em especial baterias ricas em Níquel, como a NMC811 e a NMC955, como observado na Figura 28.

As baterias LFP mantêm relevância em aplicações intensivas em ciclagem, como ônibus e parte da frota de caminhões, mas perdem participação relativa nos veículos leves, permanecendo concentradas nos segmentos mais sensíveis ao custo. Ainda assim, essas tecnologias são progressivamente substituídas pelas baterias LMFP, que atingem maturidade tecnológica de forma relativamente rápida. Ao tornarem-se economicamente competitivas, elas passam a ocupar o espaço das LFP em aplicações que demandam melhor desempenho e competem pelo mercado de veículos leves também. Já as baterias de íon-sódio, embora alcancem maturidade tecnológica ao longo do período analisado, apresentam baixa penetração no setor veicular, em função de suas limitações em densidade energética.

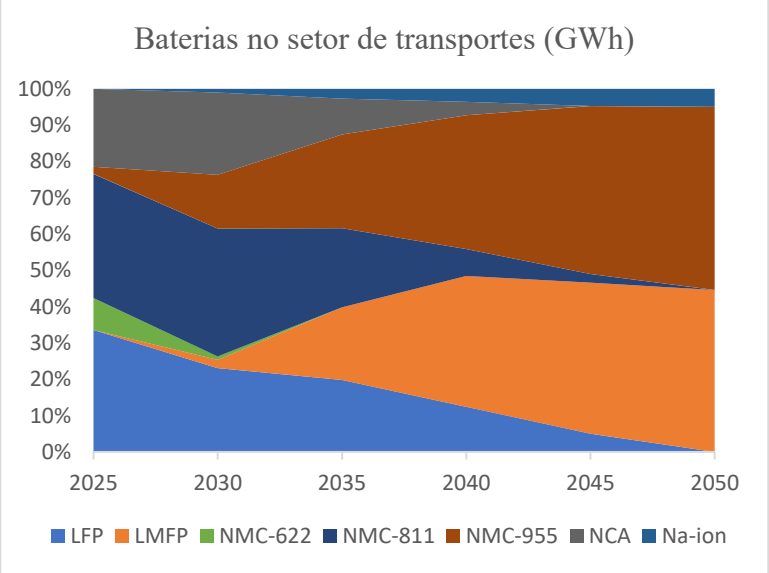


Figura 21 - Evolução da participação do mercado das baterias no setor de transporte - Cenário DT.

Fonte: Elaboração própria.

No armazenamento estacionário de energia (Figura 29), observa-se inicialmente a substituição gradual das baterias LFP por LMFP, em razão do elevado ganho de desempenho em contrapartida a um aumento marginal de custo. Contudo, à medida que a tecnologia de íon-sódio se consolida, essas baterias passam a deslocar as demais, tornando-se a tecnologia dominante nesse segmento, devido à combinação de baixo custo e desempenho adequado para aplicações estacionárias. As baterias da família NMC não alcançam participação relevante nesse tipo de aplicação.

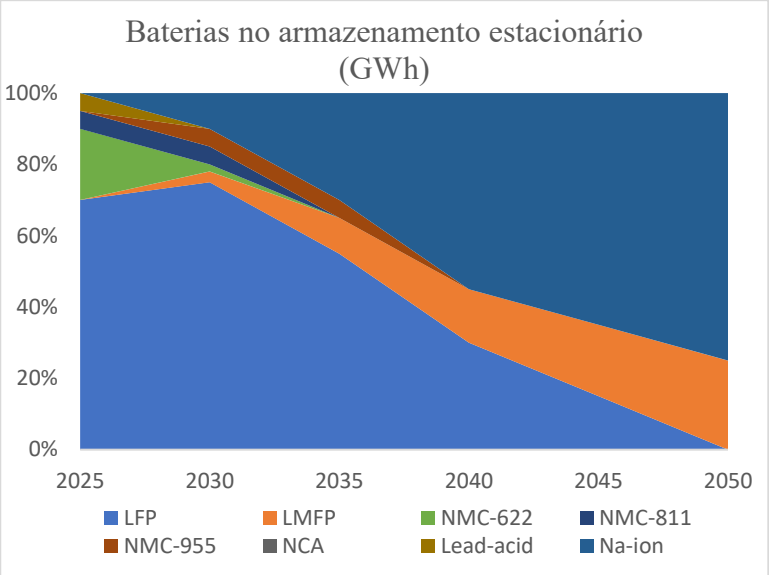


Figura 22 - Evolução da participação do mercado das baterias para o armazenamento estacionário de energia - Cenário DT.

Fonte: Elaboração própria.

4.2.2.2. Pilhas a combustível - DT

Assim como no cenário BAU, apenas as pilhas PCMTP são consideradas viáveis para aplicações veiculares. Embora o cenário DT pressuponha rápidas evoluções tecnológicas, as limitações estruturais das demais arquiteturas são significativas e ainda se encontram muito distantes de serem ultrapassadas e alcançarem viabilidade tecno-econômica e escala comercial, principalmente considerando o horizonte temporal relativamente curo e próximo do período analisado.

4.2.2.3. Motores elétricos - DT

A priorização de desempenho neste cenário leva a manutenção dos motores PMSM, por critérios de desempenho técnico e operacional, como densidade de potência, eficiência e robustez. Dessa forma, os motores PMSM ampliam seu domínio em todas as classes de veículos. Não obstante, como apresentado na figura 30, motores IM mantém uma pequena parcela do mercado, devido a sua simplicidade construtiva e bom desempenho em regimes de operação mais exigentes, como em veículos de maior velocidade.

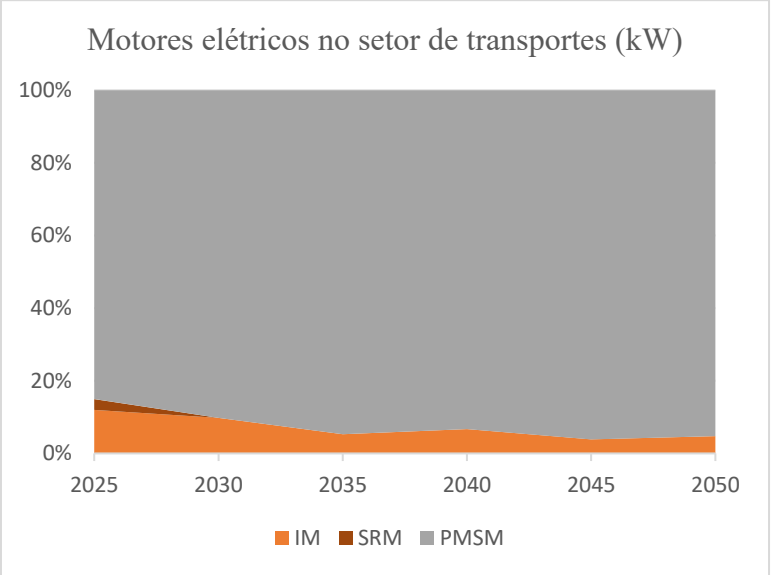


Figura 23 - Evolução da participação de mercado de motores elétricos no setor de transporte no período de 2025 a 2050- Cenário DT.

Fonte: Elaboração própria

4.2.2.4. Geradores eólicos - DT

O cenário de Disrupção Tecnológica pressupõe uma rápida difusão da tecnologia de melhor desempenho técnico agregado, favorecendo a adoção acelerada dos geradores síncronos de ímãs permanentes (Figura 31). Nesse contexto, as vantagens associadas à maior eficiência, menor demanda por manutenção, maior flexibilidade operacional e melhor desempenho em turbinas de grande porte superam potenciais as desvantagens econômicas e de cadeia de suprimentos.

Além disso, assume-se, nesse cenário, que as limitações associadas à concentração da cadeia de valor dos ímãs permanentes e à volatilidade de preços dos elementos de terras raras não constituem barreiras relevantes à difusão tecnológica. Como consequência, observa-se uma tendência clara à adoção de configurações direct drive, que apesar de terem maior intensidade de ímãs permanentes, eliminam a caixa multiplicadora, reduzem perdas mecânicas e aumentam a confiabilidade do sistema.

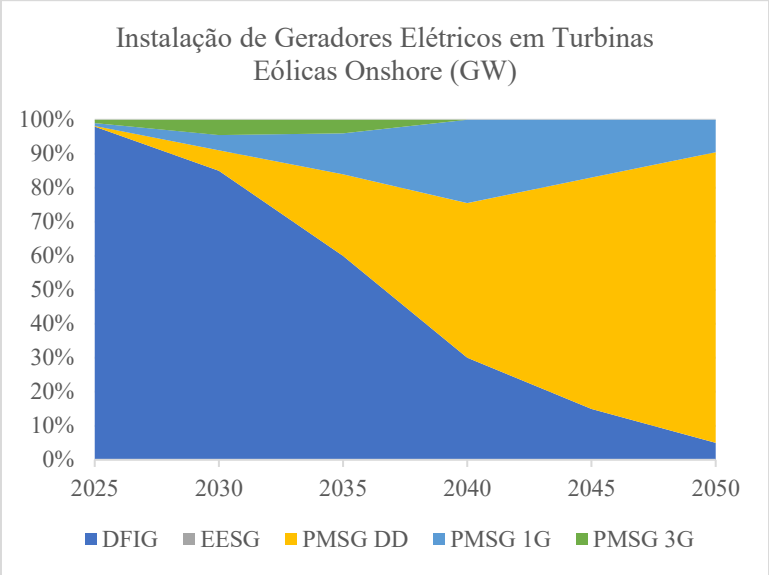


Figura 24 - Evolução da participação de geradores elétricos no setor Eólico Onshore no período de 2025 a 2050 - Cenário DT.

Fonte: Elaboração própria

4.2.2.5. Energia solar - DT

O cenário de Disrupção Tecnológica pressupõe avanços acelerados em eficiência, redução de custos das tecnologias emergentes, resultando em mudanças estruturais no perfil tecnológico do setor fotovoltaico. Nesse contexto, as células tandem Perovskite/Si atingem maturidade tecnológica e competitividade econômica, passando a desempenhar papel central nas usinas solares centralizadas, substituindo progressivamente os módulos de silício monocristalino.

Paralelamente, o aumento da competitividade das tecnologias de segunda geração impulsiona uma expansão mais expressiva dos filmes finos, tanto em aplicações centralizadas, quanto descentralizadas (Figura 32). Na geração distribuída, essas tecnologias ganham relevância ainda maior, devido a flexibilidade dos módulos, que contribui para a redução dos custos estruturais e de instalação. Com efeito, as tecnologias fotovoltaicas emergentes deixam de ocupar apenas nichos específicos e passam a integrar o mercado convencional, refletindo o ambiente favorável à inovação e à rápida difusão de novas tecnologias nesse cenário.

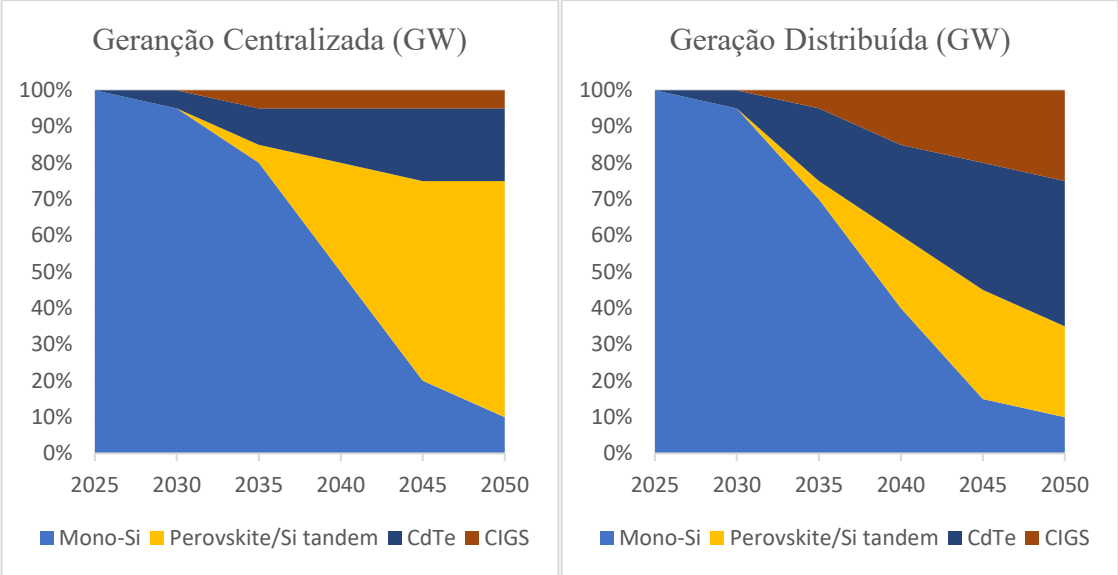


Figura 25 - Evolução da participação de das subtecnologias de geração solar centralizada e descentralizada no período de 2025 a 2050 - Cenário DT.

Fonte: Elaboração própria

4.2.3. Cenário de Restrição Material (RM)

Por fim, diferente dos demais cenários, a evolução tecnológica do cenário RM não é guiada apenas pela busca por tecnologias mais baratas e eficientes, mas também leva em consideração a composição material dos conversores e a criticidade desses materiais. Além de suas valências tecno-econômicas, as tecnologias são avaliadas de acordo com os níveis de concentração de produção, o grau de companheirismo mineral e o tamanho de mercado de seus materiais. Assim, nesse cenário prevalecem as substituições interproduto do tipo qualidade-por-elemento, em que frequentemente tecnologias de maior performance são preteridas por tecnologias de menor criticidade. As tecnologias subótimas do ponto de vista técnico-econômico acabam ganhando espaço relevante, devido à maior facilidade de acesso material e à aversão a riscos da cadeia de suprimentos.

4.2.3.1. Criticidade das tecnologias no cenário de Restrição Material

Com o objetivo de avaliar a criticidade das tecnologias de forma agnóstica, buscou-se incorporar parâmetros que representassem características estruturais comuns aos materiais críticos, em linha com os atributos discutidos no capítulo 3. Entre esses parâmetros, destacam-se a concentração da produção, o grau de companheirismo mineral e o tamanho de mercado dos materiais presentes nas tecnologias.

Para representar a concentração da produção, adotou-se o índice de Herfindahl-Hirschman[52] (HHI), calculado pela COMISSÃO EUROPEIA (2025) a partir da participação de cada país na produção global do material. O companheirismo mineral foi quantificado por meio da fração da produção obtida como subproduto de outros minerais (NASSAR, 2015). Já a proxy utilizada para representar o tamanho de mercado foi a produção mineral global no ano de 2023 (COMISSÃO EUROPEIA, 2025).

Tabela 8 - Parâmetros avaliados e critérios para atribuição da nota de criticidade elementar

Produção Mineral		**Concentração de Produção**		**Companherismo Mineral**	
Produção (kt)	Nota	HHI	Nota	Fração como subproduto	Nota
>10.000	1	0-1.000	1	0% - 10%	1
1.000-10.000	2	1.000-2.000	2	10% - 25%	2
100-1000	3	2.000-3.500	3	25% - 50%	3
10-100	4	3.500-5.000	4	50% - 75%	4
0-10	5	>5.000	5	75% - 100%	5

Fonte: Elaboração própria.

Cada indicador foi convertido em uma escala de 1 a 5, conforme os critérios apresentados na Tabela 4. O produto das notas atribuídas a cada indicador foi utilizado como medida de criticidade de cada elemento. Em seguida, essa criticidade elementar foi ponderada pela intensidade material de cada elemento em cada subtecnologia, resultando em um indicador agregado de criticidade tecnológica, que incorpora simultaneamente restrições associadas à oferta mineral e à deependência material das diferentes opções tecnológicas. A equação abaixo sumariza o cálculo realizado para a criticidade de cada subtecnologia, exposto em maior detalhe no Anexo 3, enquanto as notas de criticidades estão apresentadas na Tabela 5.

$$C_j^{tec} = \sum_i \left(\prod_{n=1}^{N} S_{i,n} \right) \cdot I_{i,j} \qquad \text{Equação (1)}$$

[52] O índice Herfindahl–Hirschman (HHI) é amplamente utilizado como indicador de concentração de mercado em diversos setores. Originalmente desenvolvido para a análise de estruturas de mercado e do poder de mercado exercido por firmas individuais no setor industrial (BUCCIARELLI et al., 2025), o HHI varia de 0 a 10.000, em que valores próximos a zero indicam um mercado altamente atomizado, enquanto o valor máximo de 10.000 corresponde a uma situação de monopólio perfeito. Nesse trabalho, o índice é calculado pela soma dos quadrados das participações relativas de produção de cada país.

Onde C_j^{tec}representa a criticidade da subtecnologia j; $S_{i,k}$ corresponde à nota atribuída ao parâmetro de criticidade n – concentração da produção, companheirismo mineral e tamanho de mercado – do elemento i; e $I_{i,j}$ representa a intensidade material do elemento i na subtecnologia k. Naturalmente, a criticidade das subtecnologias estimada pela metodologia proposta deve ser comparada exclusivamente entre as alternativas de uma mesma rota tecnológica, isto é, entre seus potenciais substitutos interproduto.

Tabela 9 - Criticidade tecnológica

Rota tecnológica	Subtecnologia	Criticidade
Bateria	Chumbo Ácido	220.80
Bateria	LFP	11.78
Bateria	LMFP	12.12
Bateria	NMC-111	32.90
Bateria	NMC-333	36.28
Bateria	NMC-532	27.42
Bateria	NMC-622	25.82
Bateria	NMC-811	20.20
Bateria	NMC-955	17.84
Bateria	NCA	23.40
Bateria	Na-ion	4.20
Motor Eletrico	IM	0.32
Motor Eletrico	SRM	0.33
Motor Eletrico	PMSM	0.61
Célula Fotovoltaica	Mono-Si	19.32
Célula Fotovoltaica	CdTe	4.26
Célula Fotovoltaica	CIGS	4.93
Célula Fotovoltaica	Peroviskite/Si	13.64
Gerador Elétrico	DFIG	0.91
Gerador Elétrico	PMSG 3G	4.69
Gerador Elétrico	PMSG 1G	6.88
Gerador Elétrico	PMSG DD	20.26
Gerador Elétrico	EESG	4.34

Fonte: Elaboração própria.

Assim, a criticidade tecnológica, em conjunto com à análise tecnoeconômica das subtecnologias, foi utilizada como referência para a definição da participação de mercado dos conversores energéticos no cenário de restrição material.

O cenário de Restrição Material considera a intensificação das limitações associadas à disponibilidade e à criticidade de materiais estratégicos, tornando a segurança de suprimento um fator determinante na escolha tecnológica.

4.2.3.2. Baterias – RM

No cenário RM, a priorização de tecnologias associadas a cadeias de suprimento menos vulneráveis impulsiona o desenvolvimento e a rápida difusão de químicas de menor criticidade, com destaque para as baterias de íon-sódio. Essas tecnologias passam a ocupar uma faixa mais ampla do mercado automotivo, deixando de se restringir exclusivamente a veículos de pequeno porte e passando a atender também parte do segmento de veículos populares, em uma lógica de substituição qualidade-por-material, isto é, orientada pela redução da dependência de materiais críticos, ainda que com algum comprometimento de desempenho.

Nesse contexto, como ilustrado na Figura 33, as baterias LFP ganham proeminência ao combinar baixa criticidade material com desempenho técnico adequado, consolidando-se como a tecnologia dominante em caminhões, ônibus e na maior parte dos veículos leves. As baterias LMFP, por sua vez, ocupam uma parcela de mercado das baterias da família NMC para veículos que demandam performance robusta. Assim, as baterias NMC perdem participação de forma significativa, tonando-se obsoletas.

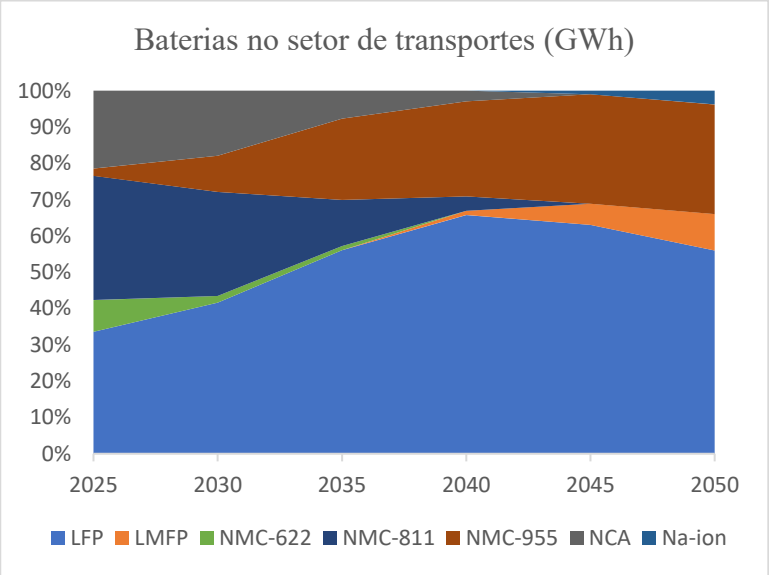


Figura 26 - Evolução da participação do mercado das baterias no setor de transporte - Cenário RM

Fonte: Elaboração própria.

No segmento de armazenamento estacionário de energia (Figura 34), as baterias de íon-sódio dominam amplamente as novas instalações, em razão de seu baixo custo, elevada disponibilidade de matérias-primas e requisitos técnicos compatíveis com esse tipo de aplicação. As tecnologias LFP permanecem com uma participação relevante, apesar de menos expressiva. Já as baterias LMFP apresentam participação residual,

enquanto as baterias NMC tornam-se pouco competitivas e praticamente ausentes nesse segmento.

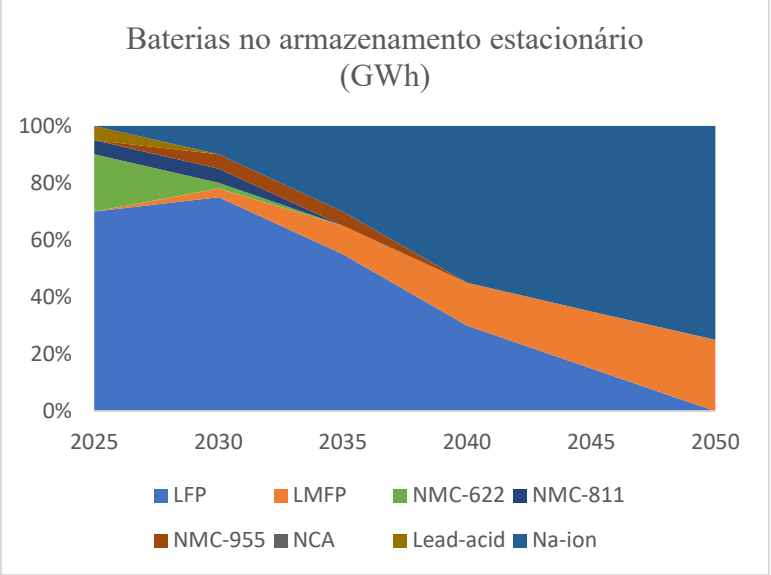


Figura 27 - Evolução da participação do mercado das baterias para o armazenamento estacionário de energia - Cenário RM.

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3.3. Pilhas a combustível - RM

Mesmo sob restrições materiais, a PCMTP permanece como a única tecnologia viável para o setor de transportes, uma vez que as limitações das demais arquiteturas não estão associadas prioritariamente à criticidade material, mas a restrições operacionais.

4.2.3.4. Motores elétricos - RM

Nesse cenário, como apresentado na Figura 35, os motores síncronos de ímãs permanentes (PMSM) perdem relevância ao longo do período analisado, em função da elevada criticidade dos elementos de terras raras utilizados nos ímãs permanentes. Embora a presença desses ímãs permita uma redução da intensidade material de cobre em relação a outras arquiteturas, esse efeito não é suficiente para compensar os riscos associados à elevada concentração geográfica da produção, ao caráter de subproduto e à limitada flexibilidade de oferta dos elementos de terras raras.

Em contrapartida, observa-se uma expansão progressiva da participação dos motores de indução. Ao longo do horizonte analisado, a combinação de menor criticidade agregada e bom desempenho técnico leva os motores IM a dominar o mercado em praticamente todas as classes de veículos. Os motores SRM, por sua vez, alcançam uma

participação de mercado limitada, pois apesar de apresentarem baixa criticidade material, sua densidade de potência e maior complexidade de controle comprometem seu desempenho.

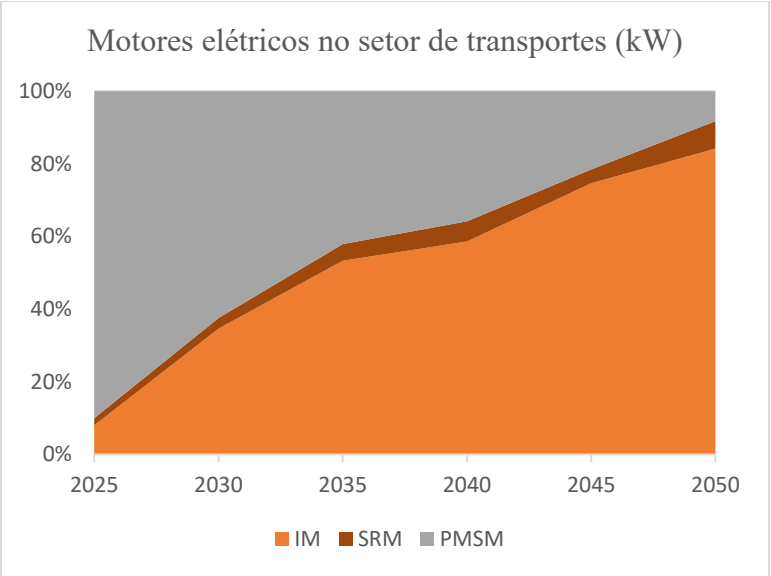


Figura 28 - Evolução da participação de mercado de motores elétricos no setor de transporte no período de 2025 a 2050 - Cenário RM.

4.2.3.5. Geradores eólicos - RM

Analogamente, no setor eólico, os geradores DFIG tornam-se a alternativa tecnologicamente mais viável, resultando em uma predominância próxima a um monopólio dessa tecnologia. Em contrapartida, os geradores PMSG apresentam elevada criticidade material em razão do uso intensivo de ímãs permanentes, sem compensação relevante na redução de outros materiais. Assim, sua participação de mercado permanece reduzida ao longo de todo período analisado, restringindo-se, sobretudo, às configurações de menor demanda por ímãs permanentes, isto é, com caixa multiplicadora de três estágios (PMSG 3G).

Diferentemente do observado nos demais cenários, considera-se também a entrada dos geradores EESG, que apresentam relativa baixa criticidade. Embora sua arquitetura implique em uma maior demanda por cobre, sua maior capacidade de operar em diferentes velocidades de vento e a ausência de ímãs permanentes favorecem sua participação de mercado, ainda que limitada.

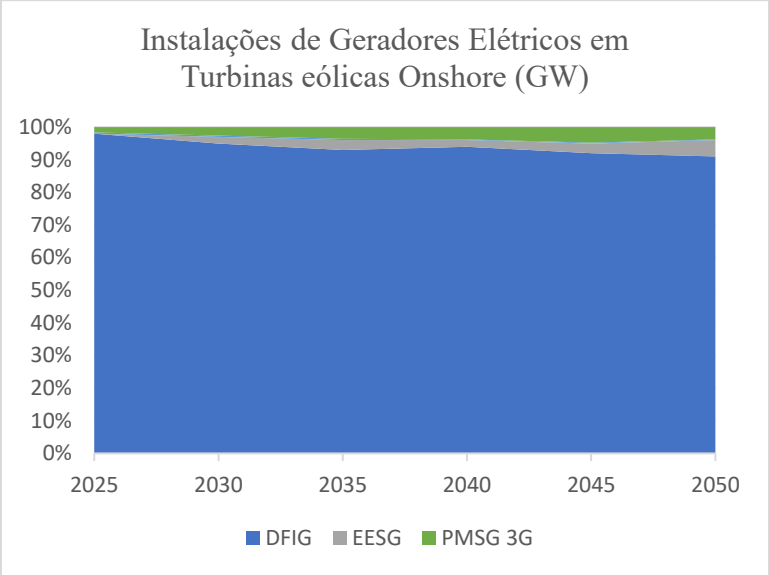


Figura 29 - Evolução da participação de geradores elétricos no setor Eólico Onshore no período de 2025 a 2050 - Cenário RM.

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3.6. Energia solar - RM

De forma contraintuitiva, a avaliação agregada de criticidade material favorece a adoção das subtecnologias da segunda geração, em detrimento dos módulos de silício cristalino. Isto ocorre, pois, embora os filmes finos utilizem elementos com elevada criticidade individual, como cádmio, telúrio, índio, gálio e selênio, sua intensidade material, de duas a três ordens de grandeza inferior à do silício, compensa essas restrições. Como resultado, as tecnologias de segunda geração dominam tanto as aplicações centralizadas quanto as descentralizadas ao longo do período analisado. Além disso, a adoção de células híbridas de Perovskite/Si é favorecida devido a sua menor intensidade material em relação ao Silício monocristalino. No entanto, sua penetração é limitada pela ampla difusão das células CdTe e CIGS, conforme ilustrado na Figura 37.

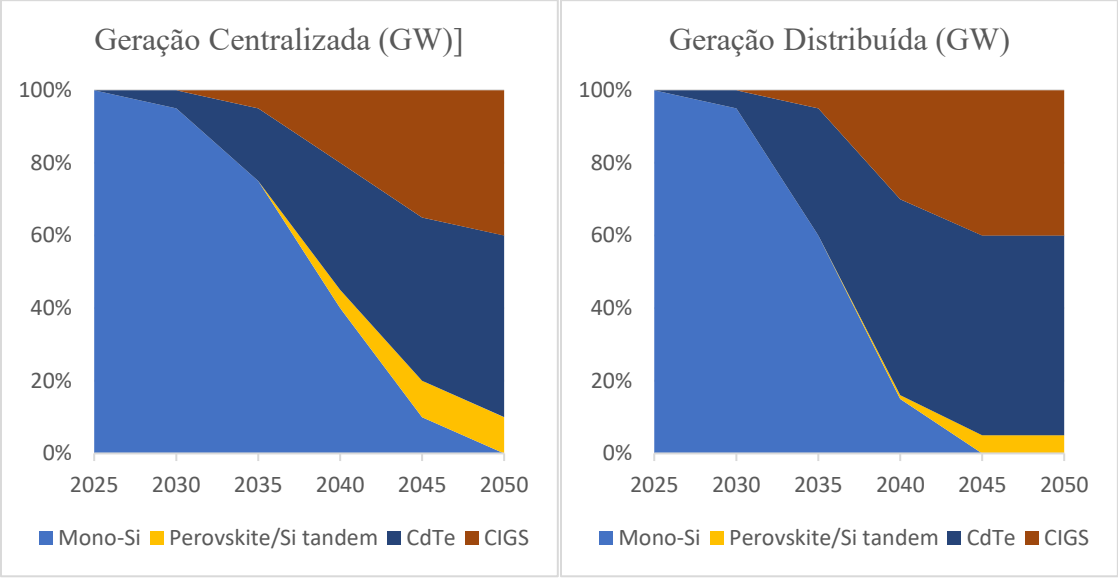


Figura 30 - Evolução da participação das subtecnologia de geração solar centralizada e descentralizada no período de 2025 a 2050 - Cenário RM.

Fonte: Elaboração própria.

4.3. Estimativa de Demanda de Elementos

Concluída a etapa de seleção das subtecnologias em cada cenário, procedeu-se à estimativa da demanda de materiais incorporados aos conversores energéticos. Como representado na equação 2, a demanda total de um determinado material i (DM_i) é obtida pelo somatório das demandas individuais adicionais de todos os conversores que o contêm, em cada intervalo de tempo t. Essa demanda é estimada com base na capacidade instalada adicional de cada rota tecnológica j em cada período (CI_{jt}), ponderada pela evolução temporal da penetração de cada subtecnologia k (PT_{kt}) e pela intensidade material do elemento i de cada subtecnologia (I_{ik}), disponível no Anexo 2.

$$DM_i = \sum_t \sum_j \sum_k \left(CI_{j,t} \cdot PT_{jk} \cdot I_{ij} \right) \qquad \text{Equação (2)}$$

Dessa forma, esta etapa utilizou os resultados do modelo referentes à capacidade instalada adicionada, em GW, das gerações eólica e solar, à capacidade de armazenamento em baterias, em GWh, e à demanda por serviços de mobilidade elétrica, expressa em passageiro-quilômetro (pkm) e tonelada-quilômetro (tkm), associada aos veículos elétricos.

Devido à compatibilidade entre os resultados fornecidos pelo modelo e as variáveis de intensidade material reportadas na literatura para conversores associados às

tecnologias eólica, solar e de armazenamento estacionário, não foram necessários ajustes nos dados fornecidos pelo modelo, o que possibilitou a aplicação direta das intensidades materiais identificadas. Entretanto, em relação a demanda material de baterias veiculares, motores elétricos e pilhas à combustível, necessitou-se realizar um processamento dos dados de saída do BLUES a respeito da demanda de mobilidade elétrica, fornecida na forma de pkm e tkm.

Assim, foi necessária a conversão desses dados em tamanho de frota (estoque), a partir de valores médios da literatura referentes à quilometragem anual por veículo e ocupação/carga típica. Além disso, como o estoque de frota estimado representa a frota líquida em operação, isto é, a diferença entre veículos entregues e veículos sucateados, foi necessário incorporar a reposição dos veículos elétricos sucateados ao longo do período analisado, a fim de também contabilizar a demanda material associada a essa reposição.

Uma vez obtido o estoque veicular entregue para cada categoria de veículos elétricos, ainda foi necessária a inclusão de parâmetros específicos a cada conversor presente nessas diferentes classes veiculares – sejam eles a capacidade média das baterias veiculares, a potência média dos motores elétricos ou a potência média das pilhas à combustível. Tais parâmetros técnicos foram obtidos a partir da literatura acadêmica.

Dessa forma, a equação 1 precisa ser adaptada para a demanda total de elementos que estão presentes no setor de transportes, de forma que CI_{jt} possa também representar o estoque adicionado de veículos da categoria j no período t, e F_k represente os parâmetros técnicos adequados para a tecnologia específica k, conforme apresentado na equação 2.

$$DM_i = \sum_t \sum_j \sum_k \left(CI_{jt} \cdot F_k \cdot PT_{jkt} \cdot IM_{ik} \right) \qquad \text{Equação (2)}$$

4.3.1. Pós-processamento dos resultados do BLUES para o setor de transportes

Diferentemente das demais tecnologias selecionadas pelo modelo, cuja capacidade adicionada incorpora simultaneamente a expansão da capacidade instalada e a reposição das unidades que atingem o fim de sua vida útil (BAPTISTA, 2025), os veículos elétricos requerem uma etapa adicional de pós-processamento para contabilizar a reposição dos veículos sucateados ao longo do tempo. Isso se deve ao fato de o BLUES fornecer como saída a demanda por transporte elétrico de passageiros e de carga em

termos de passageiro-quilômetro (pkm) e tonelada-quilômetro (tkm), respectivamente, para cada período de cinco anos, ao longo do horizonte temporal analisado (BAPTISTA, 2025). Dessa forma, esses resultados devem ser inicialmente convertidos em estoque de veículos elétricos circulante, a partir da quilometragem média anual e da taxa média de ocupação (ou de carga média, no caso do transporte de cargas) específicas para cada modalidade de veículo apresentada na Tabela 6.

Tabela 10 - Parâmetros médios utilizados para cálculo da frota de veículos.

Parâmetro	Veículos leves	Ônibus	Caminhão leve	Caminhão Pesado
Quilometragem anual média (km)	11.5	77.992	12.2	93.323
Ocupação média (passageiros/veículo)	1.5	40	-	-
Carregamento médio (Toneladas/veículo)	-	-	17	50

Fonte: Elaboração própria baseado em (BAPTISTA, 2025)

Posteriormente, para se incorporar o sucateamento da frota, isto é, sua substituição gradual e progressiva, deve-se levar em consideração a probabilidade de sobrevivência dos veículos por meio de uma função de densidade de probabilidade. Essa probabilidade é usualmente modelada por curvas logísticas, distribuições de Weibull ou funções Gamma (GREENE E LEARD, 2024). Todavia, uma vez que a introdução de veículos elétricos no Brasil ainda é relativamente incipiente, não há dados históricos suficientes para o ajuste dos parâmetros destes modelos, o que inviabiliza a elaboração de curvas de sucateamento representativas para a eletromobilidade brasileira. Por este motivo, optou-se por utilizar veículos convencionais de combustão interna como proxies para os veículos elétricos correspondentes, conforme apresentado na Tabela 7. Assim, utilizou-se curvas logísticas de sucateamento e os parâmetros utilizados são provenientes do primeiro relatório de transparência do Brasil à UNFCCC (BRASIL, 2024), de modo a refletir as características da realidade nacional.

Tabela 11 - Curvas de Sucateamento por Categoria de Veículos.

Categoria	Proxy	Equação	Parâmetros
Automóvel Elétrico	Automóvel (Ciclo Otto)	(3) $S(t) = 1 - e^{(a+(b.t))}$	a= 1,798; b= - 0,137
Comercial Leve Elétrico	Comercial Leve (diesel)	(4) $S(t) = \frac{1}{1+e^{a(t-t0)}} + \frac{1}{1+e^{a(t+t0)}}$	a= 0,17; t0= 15,30
Ônibus Elétrico	Ônibus (diesel)		a= 0,16; t0= 19,10
Caminhões Elétricos Leves e Pesados	Caminhões (diesel)		a= 0,10; t0=17,00

Fonte: Elaboração própria, baseado em Brasil (2024)

As funções logísticas 3 e 4 estabelecem o percentual da frota remanescente de veículos, sendo S(t) a fração de veículos ainda não sucateados na idade "t", e os parâmetros a e b estimados para cada modalidade de veículo definem o comportamento da curva. A Figura 8 apresenta as curvas da frota de veículos remanescente utilizadas para cada uma das categorias analisadas.

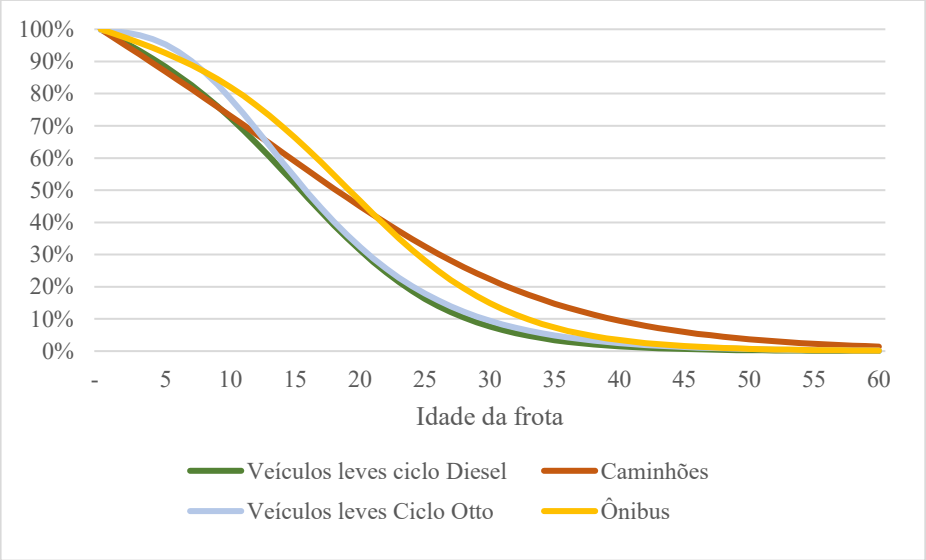


Figura 31 – Frota remanescente de veículos

Fonte: Elaboração própria (2025).

4.3.2. Veículos elétricos

Após a conversão dos resultados de demanda por mobilidade em tkm e pkm para frota adicionada de veículos, conforme descrito na seção 6.4, tornou-se necessário obter, a partir da literatura técnico-científica, os parâmetros F_k utilizados na equação (2). Esses

parâmetros variam de acordo com a tecnologia k considerada e refletem a forma como a intensidade material é reportada para cada componente. No caso das baterias veiculares, F_k corresponde à capacidade média de armazenamento de energia das baterias (kWh) por categoria de veículo, compatível com a intensidade material expressa em massa por capacidade de armazenamento (kg/kWh). Para os motores elétricos, o parâmetro representa a potência nominal do motor (kW), uma vez que a intensidade material é geralmente expressa como massa por unidade de potência (kg/W). De forma análoga, para as pilhas a combustível, F_k corresponde à potência da pilha (kW), em consonância com a métrica utilizada para a quantificação de sua intensidade material (Kg/W). A Tabela 8 apresenta os fatores (F_k) utilizados para uma das tecnologias relacionadas a veículos elétricos.

Tabela 12 - Parâmetros (F_k) utilizados para o cálculo da demanda material das tecnologias associadas a veículos elétricos.

Parâmetro (Fk)	Veículos leves		Caminhão				Ônibus
	BEV	FCEV	BELT	LiqFCELT	BEHT	LiqFECHT	BEB
Motor (kW)	80	80	115	115	200	200	207
Capacidade da bateria(kWh)	30	1.3	109.0	4.0	312.0	30.0	300.0
Pilha a combustível (kW)	-	80	-	115	-	200	-

Nota: BEV – Veículo elétrico a Bateria; FCEV – Veículo elétrico a pilha a combustível; BELT – Caminhão Leve movido a bateria; LiqBELT – caminhão leve movido a pilha à combustível líquido; BEHT – Caminhão Pesado movido a bateria; LiqFCHT – Caminhão Pesado movido a pilha à combustível líquido; BEB – Ônibus Elétrico a Bateria

Fonte: Elaboração própria, baseado em BAPTISTA (2020).

4.3.3. Baterias para Armazenamento Estacionário

As baterias para sistemas de armazenamento estacionário oferecem um serviço energético estimado pelo modelo e fornecido em dados de capacidade de armazenamento de energia instalada adicionada (GWh) (DIUANA, 2025). Aqui, já estão contabilizadas a adição de baterias para substituir as baterias que alcançaram o fim de sua vida útil (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025). Na literatura científica, a intensidade material reportada para esses equipamentos encontra-se na forma de massa por capacidade de armazenamento de energia (kg/kWh), fornecendo uma relação direta com os resultados do BLUES para a obtenção da demanda material final em toneladas, com as devidas conversões.

4.3.4. Geradores de Turbinas Eólicas

Conforme mencionado anteriormente, os valores de capacidade instalada adicional de energia eólica (MW) em cada período foram obtidos diretamente a partir do modelo BLUES (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025). A partir desses resultados e da intensidade material reportada na literatura, expressa como massa por unidade de capacidade instalada (kg/kW), a demanda material foi calculada de forma direta, dispensando a utilização de parâmetros adicionais.

4.3.5. Painéis Fotovoltaicos

De forma análoga à geração eólica, a capacidade instalada adicional por período dos conversores solares empregados na geração distribuída e centralizada (GW) foi obtida diretamente a partir do modelo BLUES (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025). Com base nesses resultados, a demanda material associada aos conversores solares foi estimada de maneira direta, utilizando a intensidade material expressa como massa por unidade de capacidade instalada (t/GW).

5. Resultados e Discussões

5.1. Resultados do modelo BLUES

A otimização de menor custo realizada pelo modelo BLUES identificou um conjunto de tecnologias de mitigação capaz de atender simultaneamente à demanda projetada por serviços energéticos e às metas de redução de GEE estabelecidas pela segunda NDC brasileira. Entre as rotas tecnológicas selecionadas, serão destacadas aquelas que implicam a formação e renovação de estoques físicos de bens de capital, devido a sua relevância para a análise de demanda por materiais críticos.

5.1.1. Trajetória energética e de emissões

Os resultados do BLUES indicam uma expansão significativa da oferta de energia primária a partir de fontes renováveis ao longo do horizonte analisado (Figura 9). Entre 2025 e 2050, a oferta renovável cresce aproximadamente 53%, impulsionada principalmente pela expansão da biomassa, que apresenta um aumento de 190% (62,5 Mtep), seguida pela energia eólica, com crescimento de 246% (24,2 Mtep), e pela energia solar, que praticamente dobra sua contribuição, com aumento de 99% (8,5 Mtep) (DIUANA, 2025).

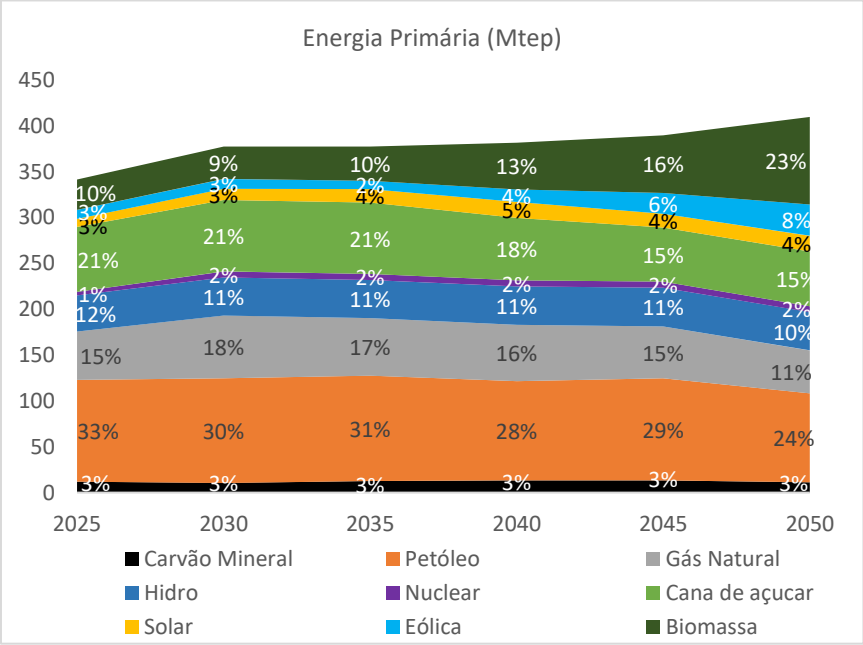


Figura 32 - Oferta de energia primária por fonte energética.

Fonte: Elaboração própria, a partir de BAPTISTA (2025).

Apesar desse avanço expressivo das fontes renováveis, os combustíveis fósseis permanecem relevantes na matriz energética, ainda que sua participação relativa caia de 49% para 38% no período. A permanência residual do carvão mineral está associada sobretudo a seu uso em setores de difícil desfossilização, em especial nas indústrias siderúrgica e metalúrgica (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025).

Em relação às emissões de GEE, o cenário modelado é compatível com a segunda NDC brasileira, com emissões totais estimadas em 1,32 $GtCO_2eq$ em 2025, 1,20 $GtCO_2eq$ em 2030 e 1,04 $GtCO_2eq$ em 2035, conforme ilustrado na Figura 10. Além disso, o Brasil cumpre com seu objetivo de longo prazo, alcançando emissões líquidas nulas de GEE em 2050. Para viabilizar esse resultado, contudo, o modelo indica a necessidade de antecipação da neutralidade líquida de carbono para aproximadamente 2040, de forma a compensar as emissões residuais de gases não-CO_2, como metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) a partir desse período. Essa compensação ocorre por meio de uma intensificação das remoções de carbono a partir de 2035, principalmente associadas à restauração de áreas degradadas, em consonância com as diretrizes do PLANAVEG (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025). Como consequência do fim do desmatamento ilegal a partir de 2030 e da restauração das áreas degradadas, o setor de Uso da Terra, mudança de Uso da Terra e Florestas (LULUCF) passa a desempenhar um papel líquido de sumidouro de carbono a partir de 2030. A partir de 2040, sua contribuição com emissões negativas ultrapassam as emissões relacionadas à Agricultura e tornam o setor de Agricultura, Florestas e Outros Usos da Terra (AFOLU) como sumidouro (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025).

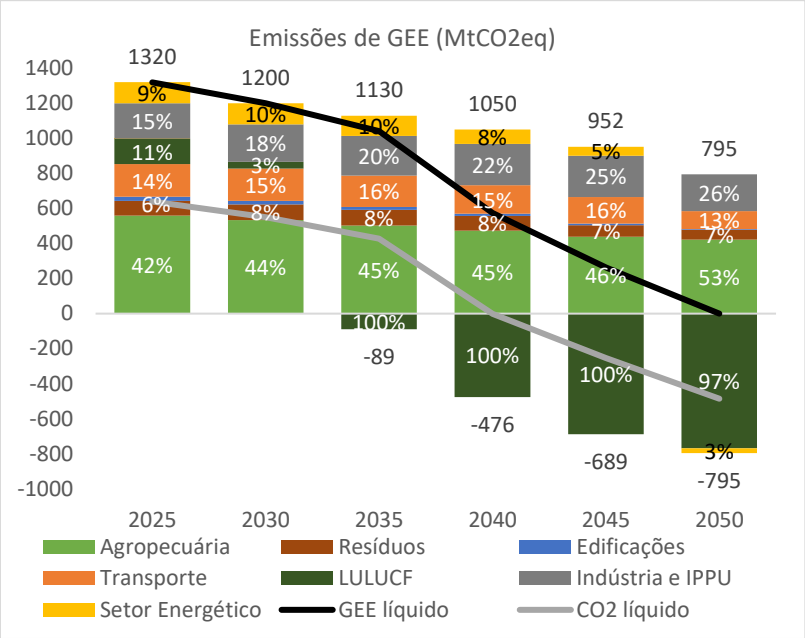


Figura 33 - Emissões líquidas de GEE e contribuição por setor e emissões líquidas de CO2.
Nota: LULUCF – Uso do Solo, Mudança de Uso do Solo e Florestas; IPPU – Processos Industriais e Uso de Produtos.

Fonte: Elaboração própria baseado em BAPTISTA (2025).

5.1.2. Setor elétrico

O papel do setor elétrico na estratégia de mitigação identificada pelo BLUES é importante tanto pela expansão da geração renovável na matriz elétrica brasileira, quanto para habilitar a eletrificação de usos finais, como no setor de transportes. Entre 2025 e 2050, as gerações solar e eólica crescem de 12% e 14%, para 17% e 33%, respectivamente (Figura 11).

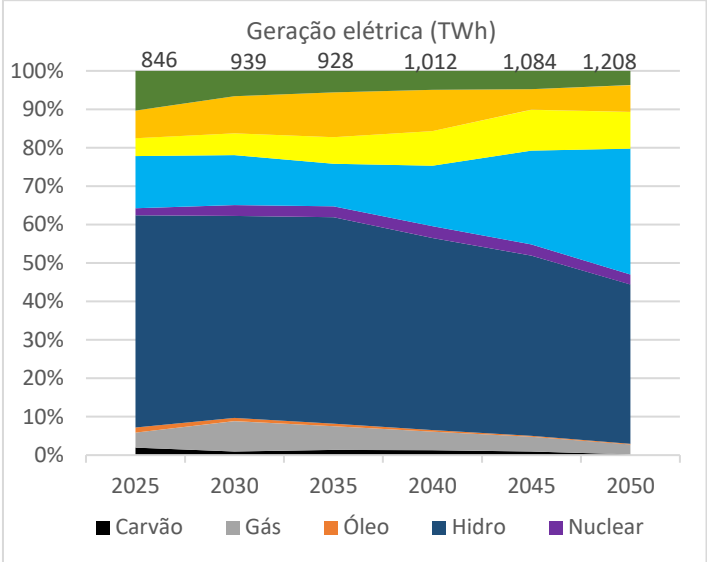


Figura 34 - Matriz elétrica brasileira para o período de 2025 a 2050.

Fonte: Elaboração própria baseado em BAPTISTA (2025).

A expansão da geração elétrica a partir da energia eólica ocorre pari passu à expansão de sua capacidade instalada, que passa de 37,5 GW em 2025 para 116,7 GW em 2050, representando um aumento líquido de aproximadamente 80 GW. No entanto, ao considerar a necessidade de reposição de ativos que atingiram o fim de sua vida útil, o volume total de capacidade adicionada ao longo do período é substancialmente maior, sendo instalados cerca de 107 GW, dos quais aproximadamente 27 GW correspondem exclusivamente à substituição de equipamentos descomissionados (DIUANA, 2025). O crescimento da capacidade instalada intensifica-se a partir de 2035, quando a reposição de ativos passa a ocorrer em volumes mais expressivos, fenômeno particularmente relevante para a análise de demanda material, uma vez que amplia significativamente o fluxo de entrada de novos equipamentos no sistema, mesmo em contextos de relativa estabilização da capacidade total. Vale destacar que o modelo BLUES selecionou apenas turbinas eólicas onshore.

Já a expansão da geração solar fotovoltaica apresenta comportamentos distintos conforme o tipo de aplicação. A geração centralizada cresce de forma contínua até 2040, com a capacidade instalada quase triplicando, de 16,9 GW para 50,9 GW (DIUANA, 2025), estabilizando-se posteriormente sem a adição, nem o descomissionamento de usinas solares . A geração distribuída, por sua vez, apresenta um rápido crescimento nos primeiros anos do horizonte analisado, com aumento de aproximadamente 76% entre 2025 e 2035, seguido por uma fase de estabilização da capacidade instalada. Contudo,

quando analisado sob a ótica de novas instalações, o comportamento da geração distribuída revela-se substancialmente maior na fase de estabilização. Para manter sua capacidade relativamente constante ao longo dos últimos quinze anos da análise, torna-se necessária a substituição recorrente de painéis que atingiram o fim de sua vida útil. Assim, enquanto a geração solar centralizada demanda a instalação de cerca de 34 GW adicionais, em linha com a expansão líquida da capacidade, a geração distribuída requer a instalação acumulada de aproximadamente 82 GW para um aumento líquido de apenas 30 GW de capacidade, evidenciando a relevância do efeito de reposição sobre a demanda material (DIUANA, 2025).

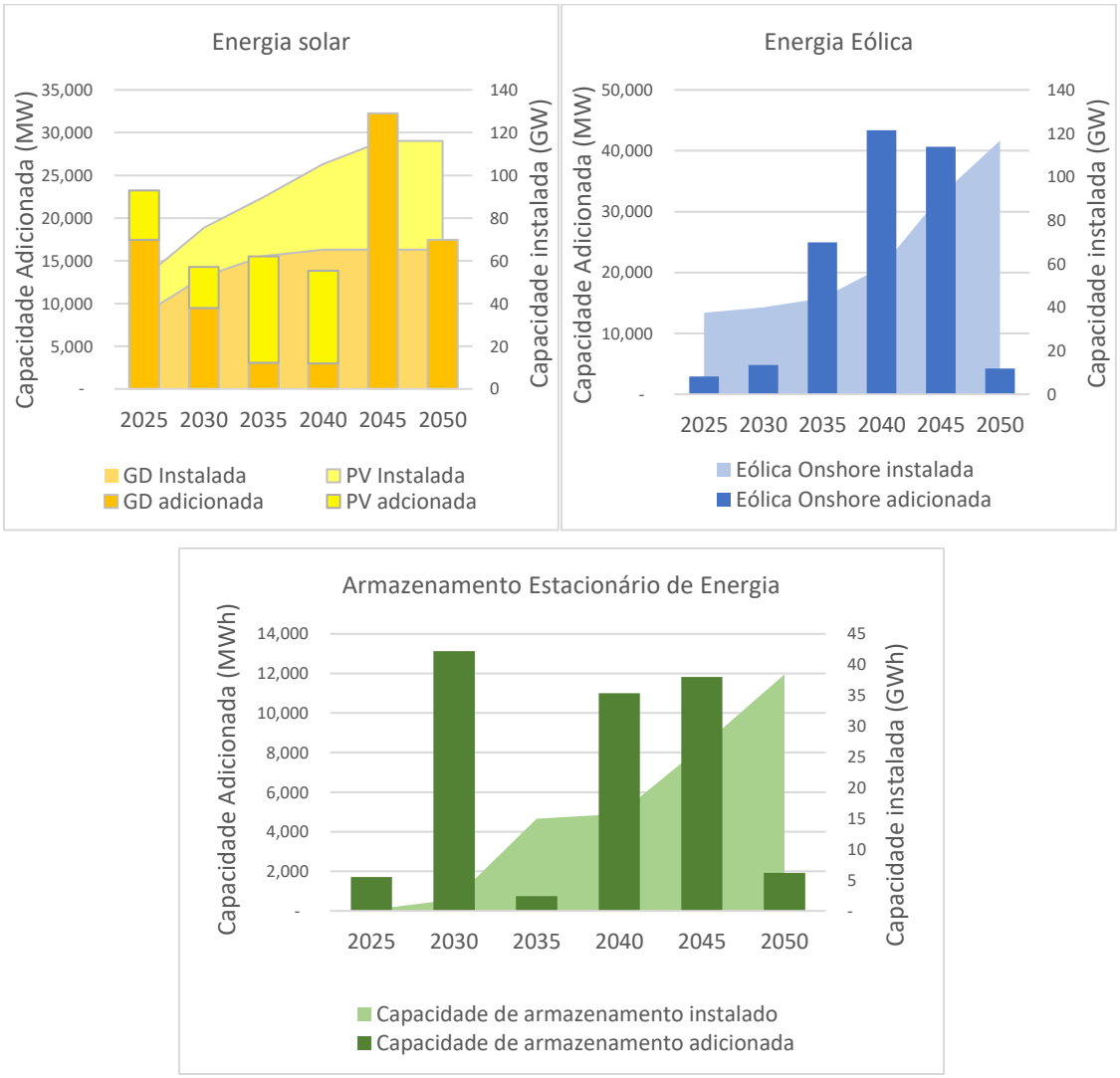


Figura 35 - Instalação e aumento de capacidade de energia solar, energia eólica onshore e de capacidade de armazenamento de energia estacionária.

Fonte: Elaboração própria baseado em BAPTISTA (2025).

A elevada penetração de fontes intermitentes, como a solar e a eólica, impõe desafios adicionais à operação do sistema elétrico, especialmente no que se refere ao balanceamento da oferta e da demanda em períodos de pico. Nesse contexto, o modelo aponta para a necessidade crescente de sistemas de armazenamento estacionário de energia. A partir de 2030, quando a participação conjunta da geração solar e eólica se aproxima de 30% da geração elétrica, observa-se uma entrada significativa de baterias no sistema, com a adição de mais de 13 GWh de capacidade de armazenamento. Após 2040, com o aumento adicional da participação das renováveis variáveis, torna-se necessária a expansão contínua do armazenamento. Ao longo de todo o período analisado, a capacidade instalada de baterias estacionárias cresce de zero para 38 GWh (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025), configurando outro vetor relevante de demanda por materiais críticos.

5.1.3. Setor de transportes

No setor de transportes, os resultados do BLUES indicam uma transformação progressiva da matriz tecnológica, orientada pela substituição de tecnologias convencionais de combustão interna por alternativas de menor intensidade de carbono (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025). Uma vez que a demanda por biocombustíveis (tradicionais e avançados) não se enquadra do escopo deste trabalho, os resultados selecionados refletem os diferentes tipos de veículos que passam a integrar a frota brasileira. Com efeito, a figura 13 apresenta a demanda por serviço de mobilidade, utilizando pkm e tkm como métricas de atividade para quantificar, respectivamente, o transporte de passageiros e de cargas, associando esses serviços aos diferentes tipos de veículos – veículos convencionais, veículos elétricos a bateria e veículos elétricos a pilha a combustível.

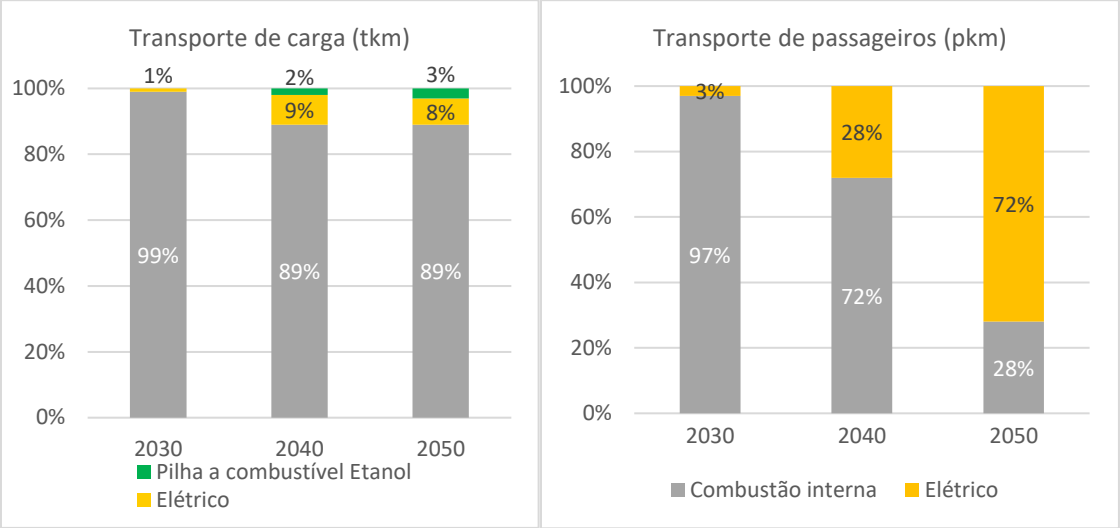


Figura 36 - Demanda por mobilidade de acordo com tipo de veículo.

Fonte: Elaboração própria baseado em BAPTISTA (2025).

Observa-se que o transporte de cargas apresenta uma evolução relativamente limitada em direção à eletrificação, concentrada sobretudo no segmento de carga urbana e no transporte de última milha (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025). A manutenção da dependência por veículos de combustão interna deve-se, em parte, à dificuldade de setores de difícil descarbonização em operar com tecnologias de menor densidade energética, como o transporte de longa distância (DIUANA, 2025; BAPTISTA, 2025). Não obstante, identifica-se alguma penetração de veículos elétricos a pilha à combustível baseados em etanol, com reforma embarcada.

Em contraste, o transporte de passageiros apresenta um processo de eletrificação profundo, em especial na década final do período analisado (DIUANA, 2025). Importa ressaltar que a eletrificação dos ônibus exerce grande impacto sobre a eletrificação da atividade da frota medida, ainda que ocorra em um número relativamente menor de unidades. Isto ocorre tanto em razão da sua maior ocupação média, quanto em função da sua quilometragem média anual superior à de veículos de passeio.

A partir da aplicação do procedimento metodológico descrito na Seção 6.4, foi possível estimar o estoque circulante de veículos por categoria tecnológica e calcular o número de unidades adicionadas em cada período, conforme apresentado na Figura 14. Esses resultados constituem a base para a quantificação da demanda por materiais críticos associada às baterias veiculares, às pilhas a combustível e aos motores elétricos,

permitindo relacionar diretamente os resultados energéticos e tecnológicos do modelo BLUES com os fluxos físicos de materiais ao longo do tempo.

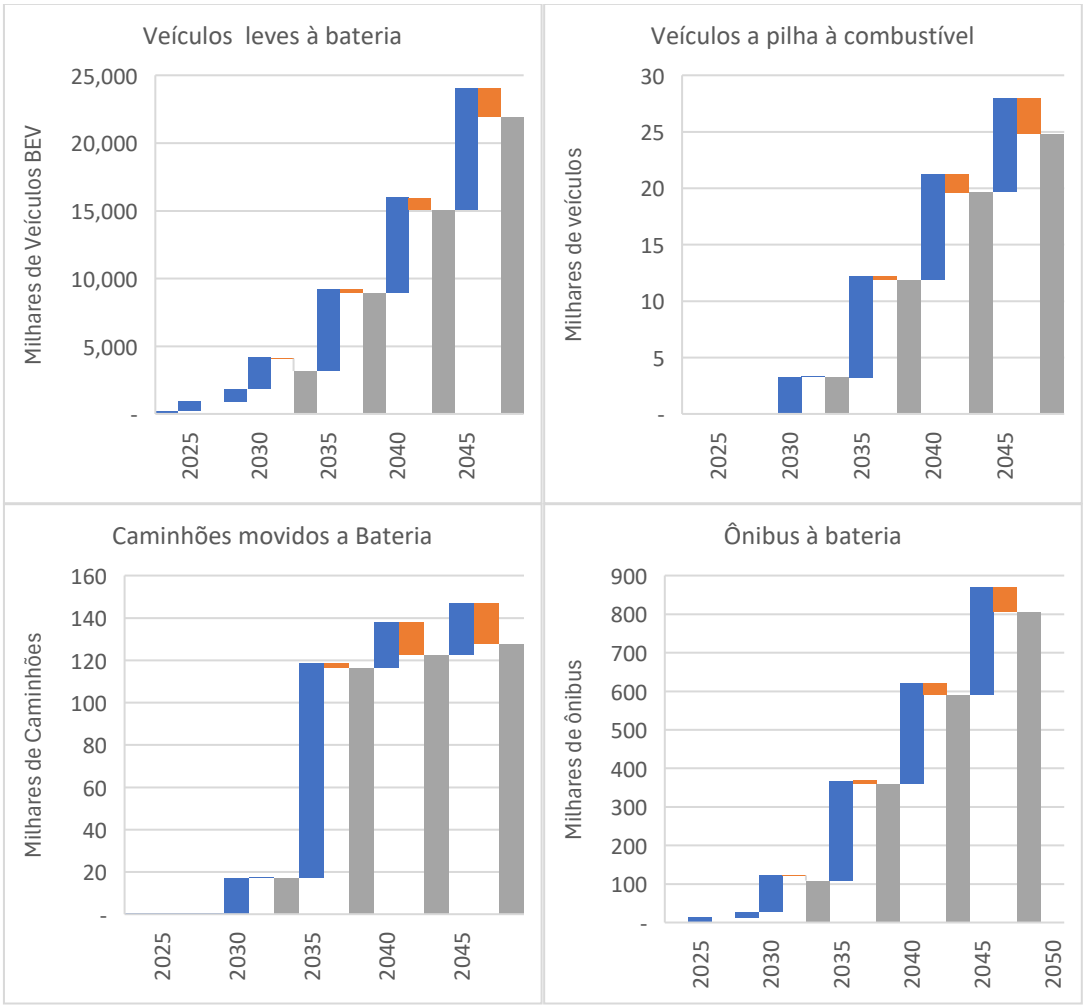


Figura 37 - Gráfico cascata do aumento de estoque de veículos elétricos[53,54]. Nota: Em cinza, estoque de veículos circulantes; em azul, estoque de veículos adicionados; em laranja, estoque de veículos sucateados.

Fonte: Elaboração própria.

5.1.4. Rotas tecnológicas identificadas e volume de controle adotado

Diante dos resultados apresentados, e considerando o foco na formação de bens de capital de tecnologias de baixo carbono, destacam-se a expansão da geração eólica

[53]No gráfico "Veículos a pilha à combustível", estão incluídos veículos comerciais leves, caminhões leves e caminhões pesados.

[54] No gráfico "caminhões movidos a bateria", estão incluídos caminhões leves e caminhões pesados.

onshore e solar fotovoltaica, a introdução de sistemas de armazenamento estacionário de energia por baterias e a eletrificação do setor de transporte por meio do uso de motores elétricos, baterias e células a combustível em veículos leves, caminhões e ônibus.

Embora a manutenção e a expansão da energia nuclear, por meio das usinas de Angra I, II e III, tenham sido selecionadas pelo modelo, a demanda por urânio associada à sua geração não foi considerada neste estudo, uma vez que se trata de um material combustível físsil. Como abordado anteriormente, o objetivo do trabalho se restringe à estimativa da demanda material associada à formação de estoques de bens de capital – isto é, à demanda direta de materiais incorporados aos conversores energéticos. Essa delimitação de escopo, elimina, também, a análise de demanda por biomassa para biocombustíveis avançados.

5.2. Resultados da demanda material

A estimativa da demanda material necessária ao cumprimento da NDC brasileira está diretamente associada a três fatores. O primeiro refere-se à trajetória de transição energética definida pelo modelo BLUES, isto é, às rotas tecnológicas endogenamente selecionadas analisados na seção anterior. O segundo diz respeito às estratégias de substituição interprodutos no âmbito das subtecnologias, representadas pelos cenários discutidos na Seção 5.3, enquanto o terceiro refere-se às respectivas intensidades materiais dos conversores considerados em cada cenário (disponíveis no Anexo 3). Em razão dessas escolhas, como esperado, a demanda material apresenta variações tanto em sua composição quanto em sua magnitude entre os diferentes cenários, mesmo sob uma mesma trajetória de transição definida pelo BLUES. Tal comportamento é ilustrado pela demanda material acumulada apresentada na Figura 38.

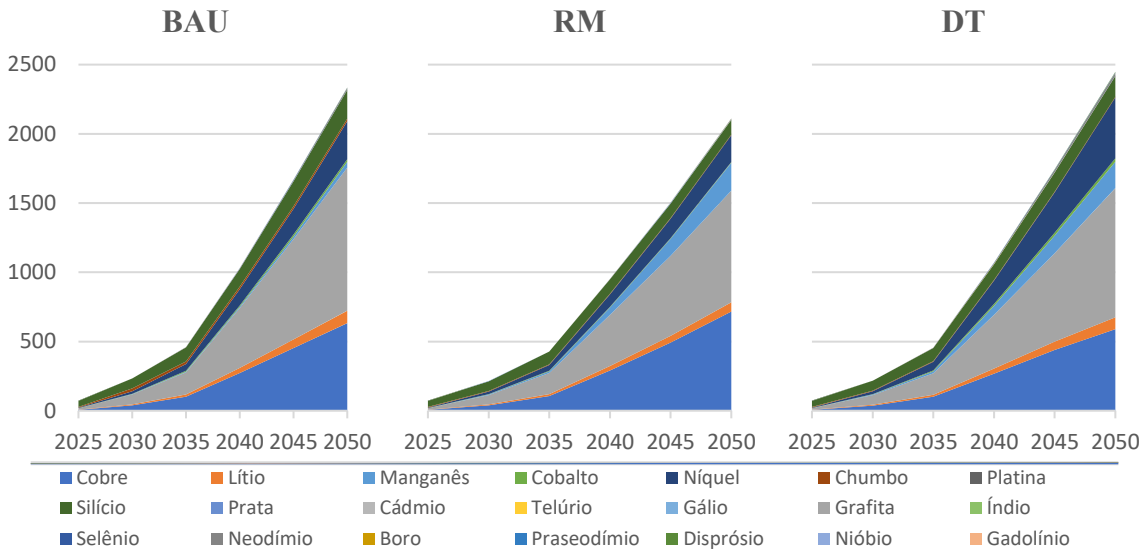


Figura 38 - Demanda de materiais acumulada 2025 - 2025. Dados em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria.

Ainda que os cenários difiram em relação à demanda material total e à sua composição, observam-se, também, similaridades estruturais decorrentes da trajetória de transição desenhada pelo BLUES. Uma dessas similaridades é o aumento expressivo da demanda acumulada de materiais a partir de 2035 em todos os cenários, à medida que a ambição climática brasileira requer a adoção acelerada de tecnologias de baixo carbono para viabilizar emissões líquidas zero de Gases de Efeitos Estufa (GEE) em 2050. Além disso, importa notar que a demanda material dos elementos varia em escalas de ordens de grandeza diferentes, refletindo a diferença entre elementos principais e elementos minoritários, como demonstrado na Figura 39.

Por essa perspectiva, observa-se que, embora a ordem de grandeza da demanda dos elementos varie entre os cenários, essa variação é relativamente limitada, especialmente nas categorias associadas às maiores demandas. Nota-se, ainda, que a distribuição da demanda material segue um padrão compatível com a regra de Pareto, na qual a maior parcela da demanda total é concentrada em um número reduzido de elementos. Assim, enquanto alguns elementos apresentam demanda de centenas de milhares de toneladas, como a Grafita, o Cobre, o Silício e o Níquel, outros apresentam uma demanda acumulada que não chega a ultrapassar alguns milhares de toneladas, como o Cobalto e os elementos que fazem parte do grupo das terras raras. Já a Platina apresenta uma demanda total aparentemente pequena em todos os cenários, de apenas 2 toneladas. Notadamente, a magnitude do emprego dos conversores escolhidos, tal qual suas respectivas intensidades materiais são determinantes para a compreensão deste aspecto.

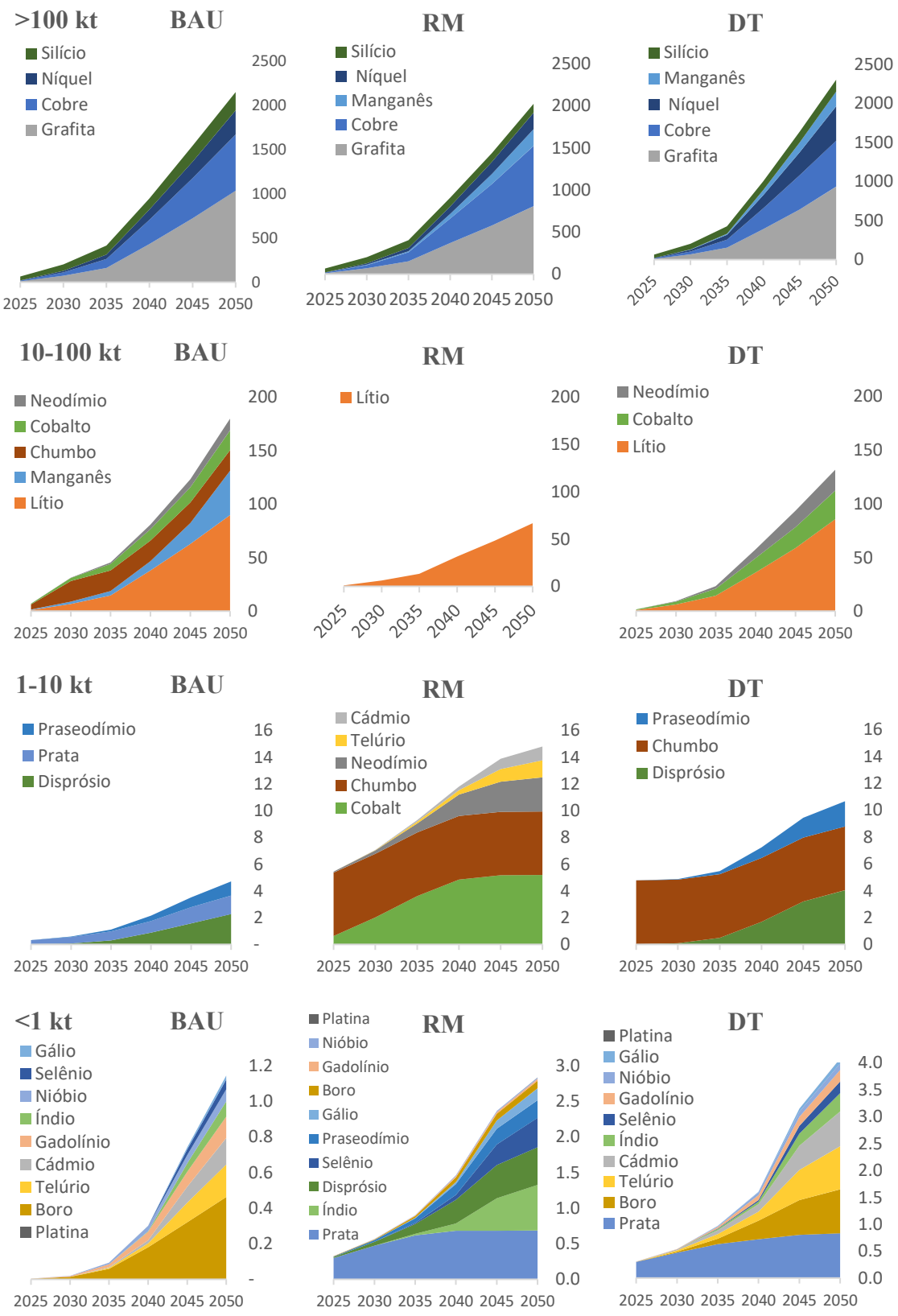


Figura 39 – Demanda material acumulada dos elementos, distribuídas de acordo com suas ordens de grandeza. Dados em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2.1. Análise de Criticidade

Essa baixa mobilidade também pode ser constatada ao se analisar as criticidades de cada cenário e a contribuição individual dos elementos para essas criticidades. Observa-se, particularmente no caso dos materiais associados às maiores demandas, uma elevada similaridade nas contribuições elementares entre os cenários, tanto em termos de magnitude absoluta quanto de variação relativa, conforme evidenciado pelo comportamento dos dados no gráfico 40. A quantificação das contribuições elementares é obtida a partir do produto entre a demanda material acumulada de cada elemento pela sua respectiva criticidade, apresentada no Anexo 1. A soma das criticidades de cada elemento compõe a criticidade total do cenário.

Como evidenciado pelos resultados, a metodologia proposta para a seleção tecnológica e a construção do cenário RM logrou em uma redução de 28% na criticidade em relação ao cenário BAU. Tal resultado é particularmente relevante, pois evidencia, a priori, o potencial das escolhas subtecnológicas em mitigar a vulnerabilidade material associada à transição energética. Em contrapartida, no cenário de disrupção tecnológica, observou-se uma redução mais modesta, de apenas 5%, apesar de a demanda material acumulada nesse cenário ter sido superior. Essa redução de criticidade é atribuída principalmente à redução da demanda por grafita nas baterias estacionárias e veiculares, a partir da introdução de baterias de íon sódio nestes setores.

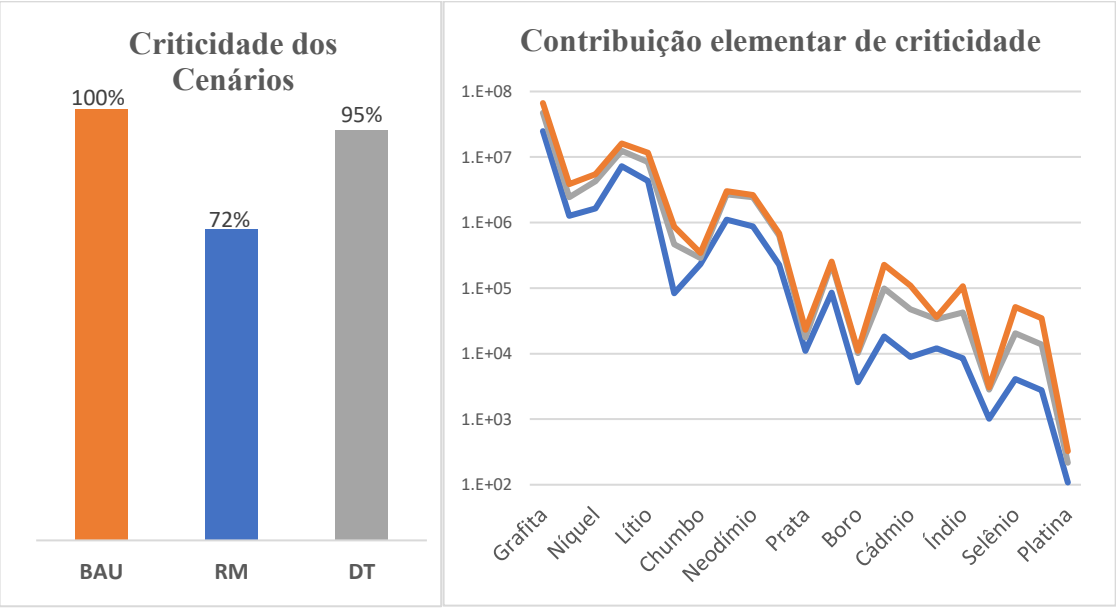


Figura 40 – Gráfico a esquerda: Criticidade relativa dos cenários em comparação com o cenário BAU. Gráfico à direita: contribuição elementar de criticidade em cada cenário.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Outra característica comum a todos os cenários é a predominância do setor de transportes na demanda material total, conforme ilustrado na figura 41. Essa característica, entretanto, não é exclusiva desse trabalho, também ocorrendo, por exemplo, nos três cenários globais produzidos pela IEA (2025) em seu estudo sobre materiais críticos. Naturalmente, a causa para essa preponderância é multifatorial e para ser explicada por completo, devem-se levar em consideração as premissas e condições adotadas em cada modelo. Ainda assim, podem ser destacadas algumas características intrínsecas ao setor de transportes que tendem a amplificar sua intensidade material, como a elevada taxa de reposição dos veículos, que acarreta a substituição contínua da frota, e a natureza altamente atomizada da demanda por mobilidade. A predominância de veículos individuais, em detrimento de soluções coletivas, limita ganhos de escala e resulta em maior demanda material por unidade de serviço prestado. Essa característica justifica, também, o conjunto de elementos de maior demanda – todos envolvidos na composição de baterias eletroquímicas, como será analisado posteriormente.

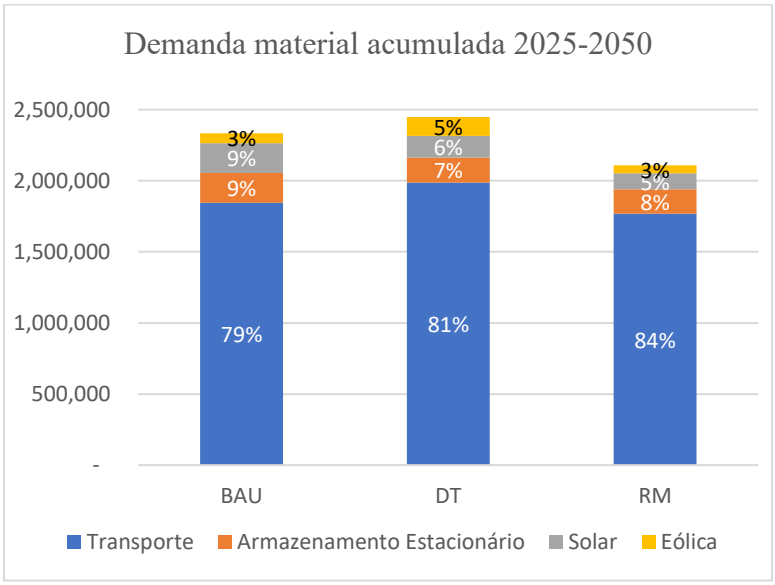


Figura 41 - Demanda material acumulada entre 2025-2050 por setor em cada cenário

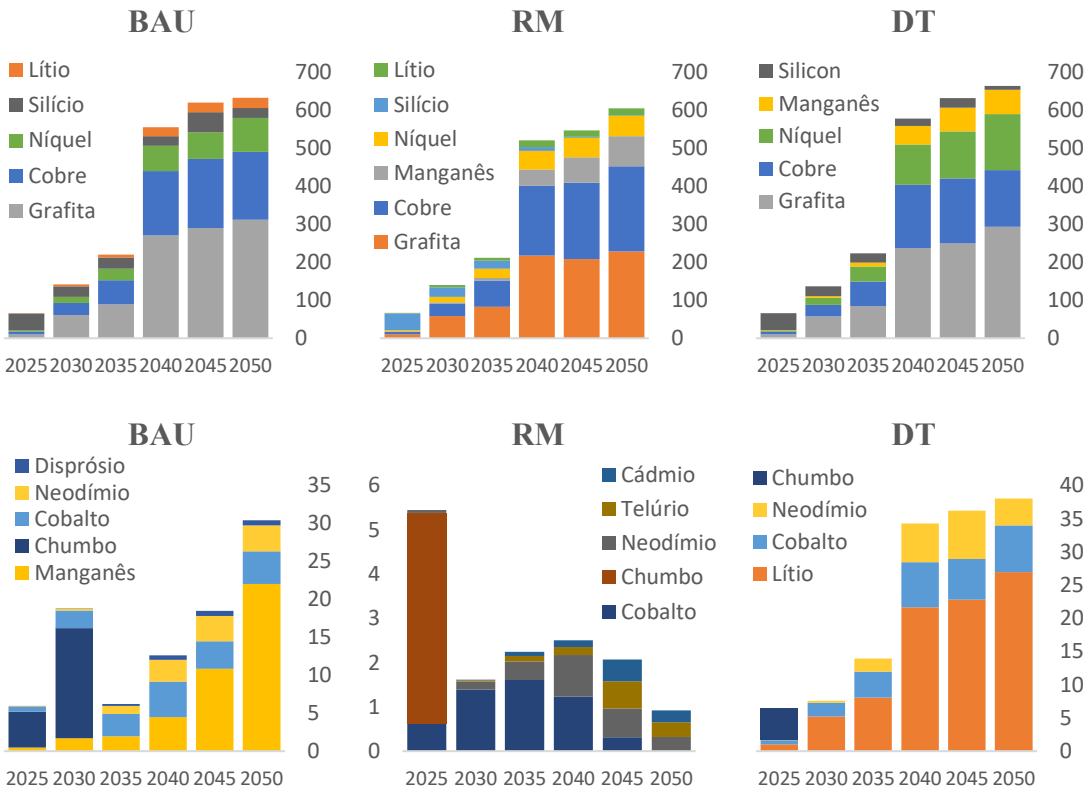
Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2.2. Demanda incremental

Não obstante ao comportamento geral da demanda material acumulada, interessa também avaliar os efeitos particulares das escolhas tecnológicas, bem como a intensidade e a cadência da demanda individual dos elementos ao longo do período avaliado. Para este tipo de análise, é mais adequada a utilização da demanda incremental de cada elemento, a fim de observar da flutuação e a volatilidade da demanda de cada material,

como apresentado na Figura 42. Essa visão, organizada de acordo com as rotas tecnológicas analisadas, possibilita a identificação dos momentos críticos de crescimento acelerado da demanda e os possíveis gargalos de fornecimento, bem como as janelas de oportunidade para o desenvolvimento de políticas industriais e de planos de diversificação de fornecedores.

Além disso, essa abordagem contribui para a formulação de estratégias mais dinâmicas de planejamento setorial, alinhadas à evolução tecnológica e à transição energética. Com efeito, ao explicitar a temporalidade da demanda, torna-se possível articular estratégias de agregação de valor e decisões de investimento ao longo das cadeias produtivas. Esse alinhamento pode não só estimular o emprego das tecnologias de baixo carbono, mas também fortalecer a inserção do Brasil em cadeias globais de valor, ampliando exportações, atrair investimentos em processamento e refino e estimular o desenvolvimento tecnológico doméstico. Ademais, a internalização de etapas de maior valor agregado – como beneficiamento, manufatura de componentes e, eventualmente, reciclagem –, pode gerar emprego qualificado e reduzir vulnerabilidades externas.



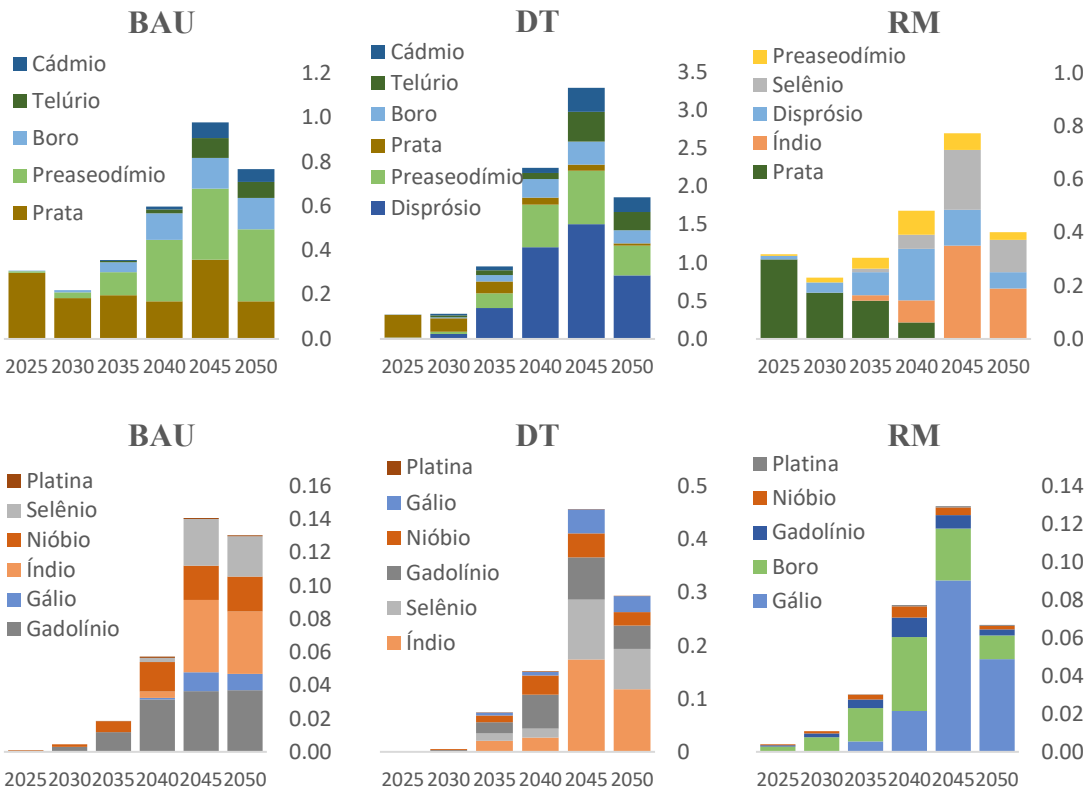


Figura 42 - Demanda incremental por período por cenário. Demanda em milhares de toneladas.
Nota: Os elementos não estão agrupados pela faixa de ordem de grandeza da demanda, mas sim para facilitar a visualização das demandas.

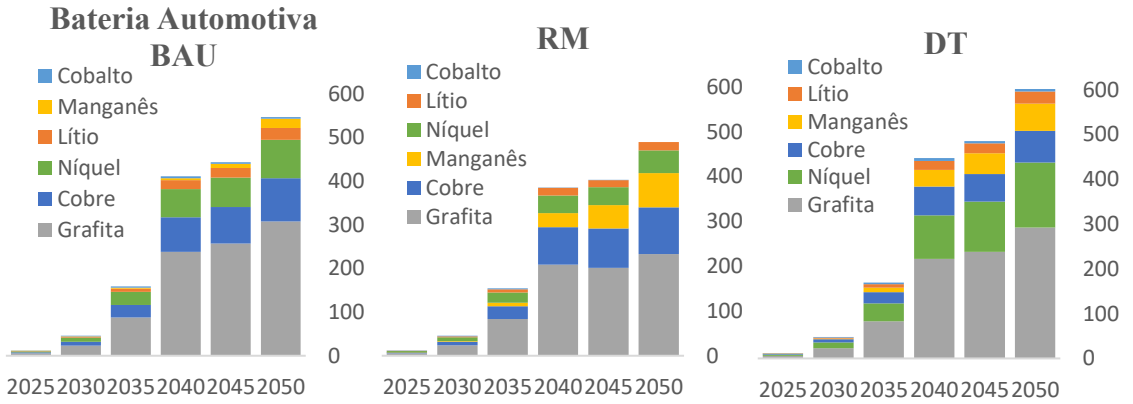
Fonte: Elaboração própria (2025).

Conforme discutido anteriormente, o setor de transportes é o principal responsável pela demanda material em todos os cenários analisados. Além dos fatores estruturais intrínsecos a esse setor, destaca-se a elevada intensidade material associada às baterias elétricas, o que exerce influência decisiva sobre a composição da demanda. Dessa forma, a grafita, presente em todas as baterias de íon lítio consideradas neste estudo e caracterizada por uma intensidade material média próxima a 0,9 kg/kWh, configura-se como o elemento de maior demanda material em todos os cenários. O lítio, embora também esteja presente em quase todas as baterias veiculares e em parcela relevante das baterias estacionárias, apresenta uma intensidade material média substancialmente menor, (aprox. 0,095 kg/kWh), o que resulta em uma demanda acumulada uma ordem de grandeza menor em relação a grafita.

Não obstante, as escolhas tecnológicas associadas aos cenários RM e DT, em especial a maior adoção de baterias de íon-sódio, contribuem para a redução geral da demanda material nesses cenários e, em particular para aliviar a demanda por grafita e por lítio. Em paralelo, observa-se um aumento da demanda por manganês nestes cenários,

devido à sua presença nas baterias Na-íon e impulsionada pela maior penetração das baterias do tipo LMFP. De fato, a demanda por manganês e por níquel apresenta maior sensibilidade ao efeito de substituição interproduto das subtecnologias selecionadas. No cenário BAU, a difusão tardia e gradual das baterias LMFP limita a demanda por manganês, enquanto a manutenção da forte presença das baterias NMC, com químicas cada vez mais ricas em níquel, sustenta níveis elevados de demanda por esse elemento. No cenário RM, observa-se uma substituição mais expressiva das baterias NMC por tecnologias LMFP e de íon-sódio, resultando no aumento da demanda por manganês e na redução da demanda por níquel. Já no cenário de disrupção tecnológica, a coexistência significativa das baterias NMC e LMFP conduz a níveis elevados de demanda tanto para manganês quanto para níquel.

Outro elemento que apresenta variação significativa entre os cenários é o cobalto, cuja demanda depende não apenas da permanência das baterias da família NMC, mas também do ritmo de substituição entre suas diferentes subtecnologias. Isso se deve ao fato de as composições químicas mais ricas em níquel acarretarem a substituição progressiva do cobalto pelo níquel em seus catodos. Dessa forma, a transição das baterias NMC-662 para as baterias NMC-811 e, posteriormente, para as baterias NMC-955 resulta em uma elevação da demanda por níquel, em detrimento do cobalto em todos os cenários analisados. A análise da demanda incremental dos elementos utilizados em baterias pode ser observada na figura 43.



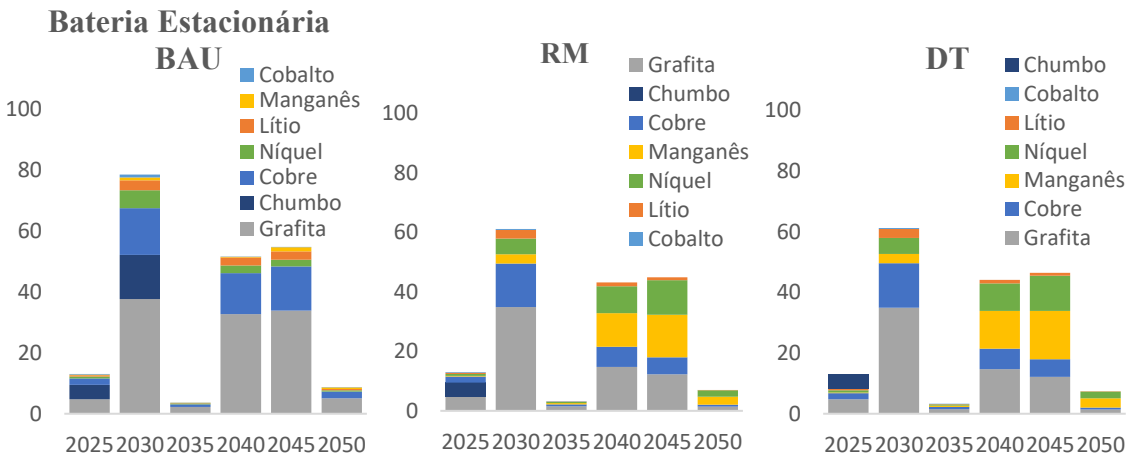


Figura 43 - Demanda Incremental dos elementos utilizados em baterias. Valores em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

O cobre, por sua vez, apresenta um comportamento relativamente estável entre os cenários, em razão de sua ampla presença em diferentes rotas tecnológicas. Além de possuir elevada intensidade material nas baterias de íon-lítio, o cobre constitui o principal elemento crítico empregado em motores elétricos e em geradores eólicos, além de poder ser empregado, em menor escala, nas células fotovoltaicas de segunda geração CIGS. Assim, ainda que esteja ausente das baterias de íon-sódio, o aumento da demanda por motores de indução no cenário RM e por geradores PMSG no cenário DT atua no sentido de compensar sua redução nas baterias, resultando em níveis agregados de demanda relativamente semelhantes entre os cenários.

A compreensão desse comportamento agregado exige, contudo, uma análise mais detalhada das escolhas tecnológicas associadas aos motores e geradores elétricos. No caso dos motores, observa-se um claro trade-off entre a demanda por cobre e por ímãs permanentes à base de neodímio (NdFeB). No cenário RM, a predominância de motores de indução, adotada como estratégia para reduzir a criticidade do cenário por meio da diminuição do uso de ímãs permanentes, implica no aumento significativo da demanda por cobre. Essa lógica, entretanto, não se aplica da mesma forma aos geradores elétricos, uma vez que os geradores PSMG combinam o uso de ímãs permanentes com uma elevada intensidade material de cobre, fenômeno que se torna particularmente evidente no cenário DT, como ilustrado na Figura 44.

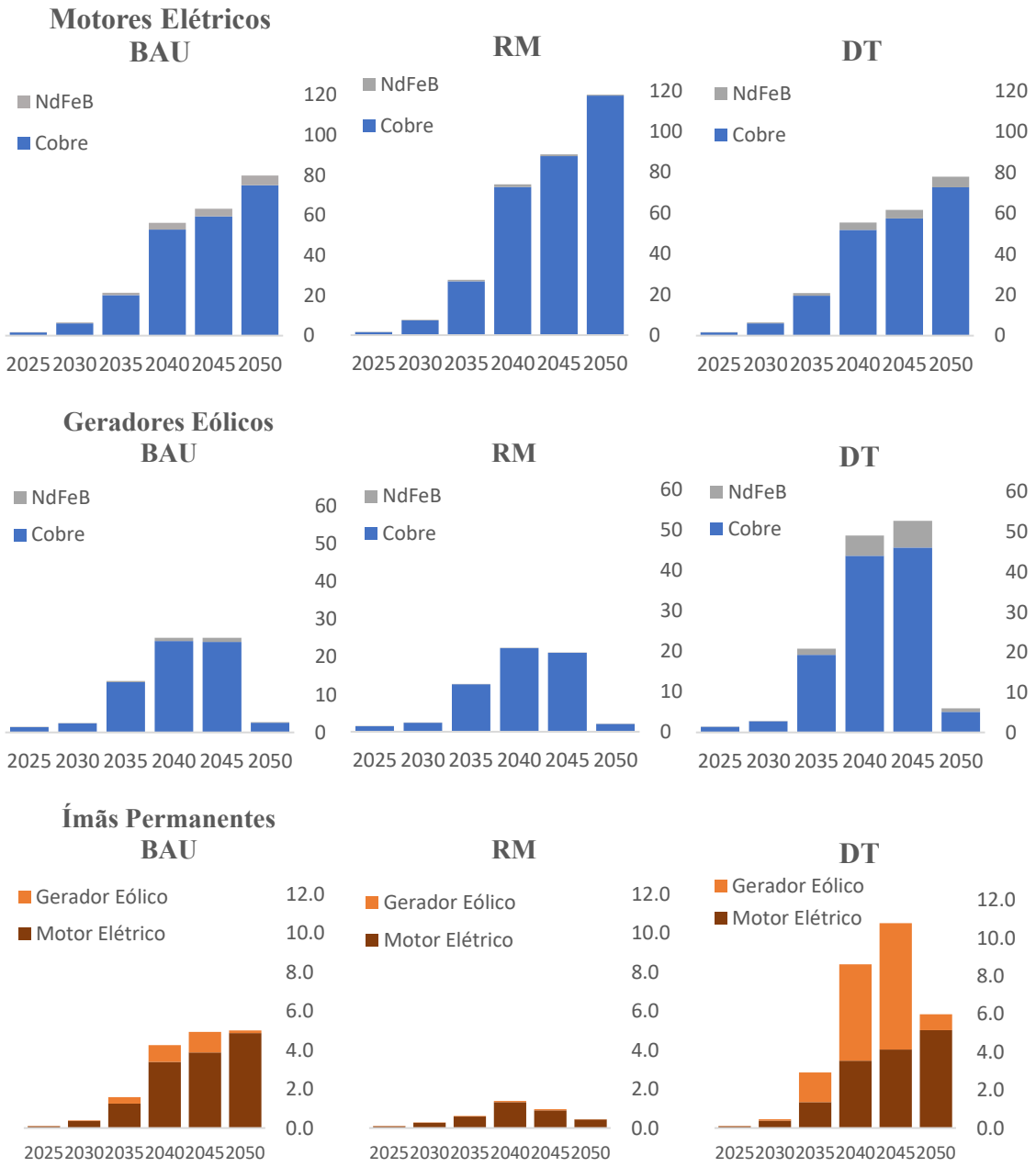
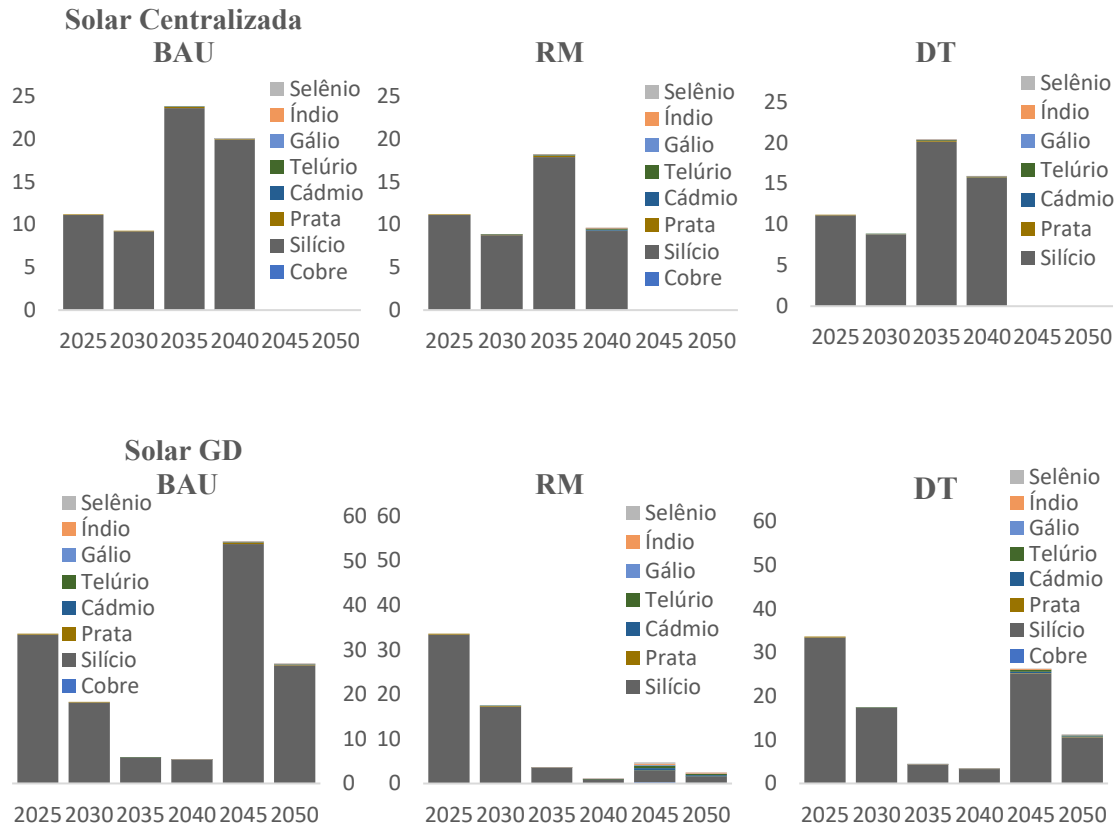


Figura 44 - Demanda incremental de cobre e de ímãs permanentes em geradores eólicos e em motores elétricos. Valores em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

No caso do setor solar, a maior intensidade material do silício dificulta a comparação direta dos impactos materiais das subtecnologias de segunda geração em cada cenário (Figura 45). Com efeito, em função dessa alta intensidade material, o silício é o único elemento dentre os de maior demanda que não está associado a veículos elétricos. Ainda assim, torna-se visível a influência dos filmes finos na redução da demanda material do setor nos cenários RM e DT, aliviando o aumento expressivo da demanda de silício que ocorre a partir de 2040 no cenário BAU, devido à ausência dessas

alternativas. No cenário de disrupção tecnológica, a entrada da tecnologia de terceira geração do tipo tandem Perovskite/Si também contribui para a redução da demanda por silício, em função de sua menor intensidade material. Contudo, seu efeito ocorre em menor escala, quando comparado aos das tecnologias de filmes finos, como CdTe e CIGS.



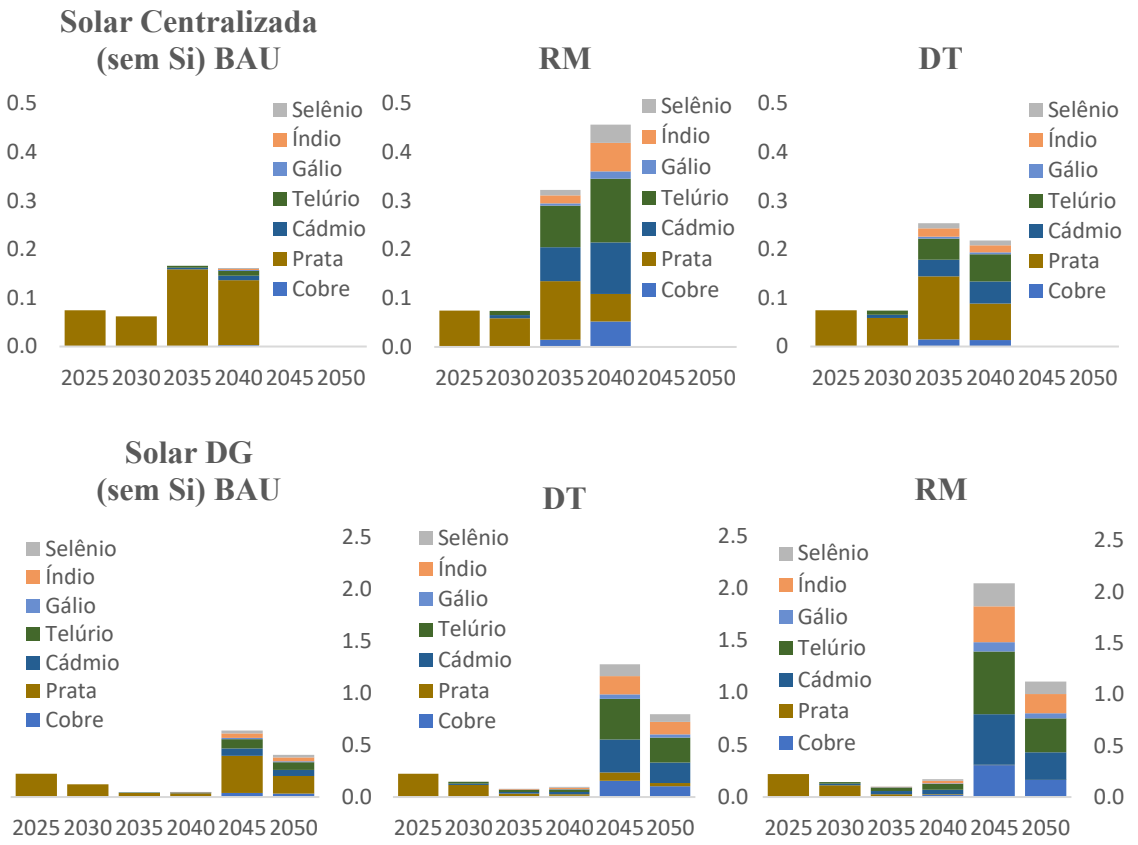


Figura 45 - Demanda material incremental do setor solar. Demanda expressa em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Por fim, a demanda por platina (Figura 46) permanece a mesma em todos os cenários, pois não foram identificados substitutos viáveis para as pilhas PCMTP no período analisado. Devido à sua baixa intensidade material e, no âmbito das tecnologias de baixo carbono selecionadas pelo BLUES, da restrição de sua aplicação às pilhas a combustível, cuja penetração também se mostrou limitada, a demanda por esse material foi a mais baixa dentre os elementos analisados.

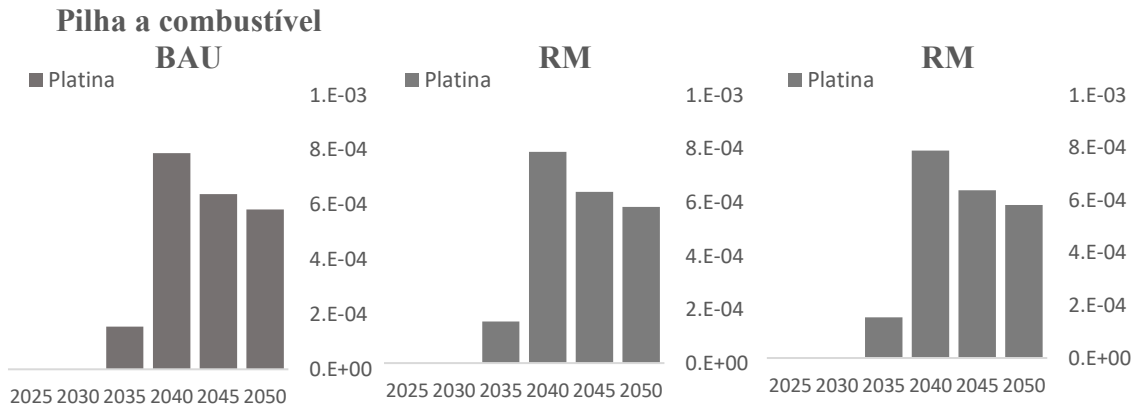


Figura 46 - Demanda material incremental do setor de transportes em milhares de toneladas. Nota: NdFeB – Ímã permanente de Neodímio

Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2.3. Oferta vs. demanda

As duas métricas analisadas até o momento, i.e., demanda acumulada e demanda incremental, fornecem informações complementares acerca dos riscos e das oportunidades associados à transição energética, além de dialogarem de maneira distinta com a oferta de materiais. A demanda acumulada está diretamente relacionada às reservas minerais, sendo particularmente relevante para avaliar o potencial de produção doméstica, as oportunidades de exportação e o grau de dependência externa. Os riscos associados a essa métrica dizem respeito sobretudo à escassez absoluta, isto é, à eventual inviabilidade da transição energética em função da inexistência de depósitos suficientes de determinados materiais em condições tecnológicas e econômicas de extração. Sob uma perspectiva nacional, a relação entre a demanda acumulada e as reservas disponíveis relacionam-se à soberania nacional à e independência mineral. Essa relação evidencia, por um lado, riscos de dependência externa e, por outro, oportunidades de expansão da produção doméstica de insumos minerais para a transição energética. Ao mesmo tempo, a magnitude da demanda interna projetada indica o potencial de captura de valor em território nacional, por meio das cadeias produtivas associadas a esses materiais.

A demanda incremental, por sua vez, relaciona-se mais diretamente à capacidade produtiva e ao ritmo de expansão da oferta, permitindo avaliar se a produção consegue acompanhar a evolução da demanda. Nessa perspectiva, os riscos estão associados à escassez relativa, caracterizada por descompassos temporais entre oferta e demanda em períodos específicos, ainda que as reservas minerais existam em termos absolutos. Essa métrica é particularmente relevante para identificar gargalos de curto e médio prazo, capazes de afetar preços, disponibilidade e a viabilidade econômica das tecnologias de baixo carbono. Por outro lado, a identificação prévia desses picos de demanda cria condições para o planejamento antecipado da oferta, seja pelo direcionamento de investimentos em capacidade produtiva, seja pela diversificação de fornecedores e pelo estímulo à reciclagem e à inovação tecnológica. Assim, pode-se reduzir vulnerabilidades e aumentar a resiliência das cadeias associadas à transição energética.

Nesse sentido, buscou-se comparar as métricas relativas à demanda com seus pares referentes à oferta. À luz da análise da demanda incremental, procedeu-se à comparação entre a demanda projetada em cada período e a produção atual brasileira dos respectivos materiais. Embora os níveis de produção devam variar ao longo do tempo, características estruturais da indústria mineral, como sua elevada intensidade de capital e

o longo ciclo de desenvolvimento de novas minas tornam essa comparação relevante para avaliar se a capacidade produtiva atual é compatível com as exigências da transição energética, em epscial, dante da possibilidade de internalizar etapas produtivas das tecnologias de baixo carbono em território nacional. Essa abordagem permite, portanto, identificar, de forma preliminar, potenciais riscos de oferta, bem como oportunidades de desenvolvimento tecnológico de produtos de maior valor agregado no curto e médio prazo.

Com efeito, aumentos abruptos da demanda representam desafios não apenas para a produção mineral, mas também para as etapas subsequentes das cadeias produtivas, incluindo beneficiamento, refino e manufatura dos conversores tecnológicos. Caso essas cadeias não sejam adequadamente planejadas e coordenadas, tais descompassos podem comprometer a velocidade e a intensidade de diversas estratégias de transição energética, seja por indisponibilidade física de insumos, seja pela elevação de custos a níveis proibitivos.

Cabe ressaltar, contudo, que essa análise idealmente deveria considerar a demanda total dos materiais, uma vez que os conversores energéticos competem por esses insumos com outros setores da economia. Assim, ao restringir a comparação à demanda associada exclusivamente à transição energética em um único país, os resultados não indicam necessariamente um desbalanço inequívoco entre oferta e demanda, mas sinalizam um crescimento relativo da participação dos conversores energéticos no consumo total desses materiais. Esse deslocamento pode, dessa forma, desencadear impactos econômicos relevantes em outros setores.

A abordagem adotada é, portanto, deliberadamente conservadora, na medida em que já fornece sinais de alerta mesmo quando se considera apenas a demanda da transição energética. Esse conservadorismo é reforçado, devido ao fato de a comparação realizada utilizar dados do elemento contido na produção beneficiada, isto é, em um estágio inicial da cadeia de valor, enquanto a demanda é expressa em termos de material efetivamente incorporado nas tecnologias, já descontadas perdas ao longo do processo de manufatura.

A escolha pela produção beneficiada, em detrimento da produção bruta, justifica-se não apenas por representar uma etapa mais próxima à manufatura das tecnologias analisadas, mas também por corresponder à forma padronizada de mercados internacionais de commodities minerais. O beneficiamento constitui a etapa inicial do processo de concentração do teor dos minérios, na qual são removidas impurezas e material estéril. Essa etapa é fundamental para viabilizar economicamente o transporte

mineral e para seu posterior refino ou utilização em processos industriais ao reduzir volumes, custos logísticos e gastos energéticos.

Ao mesmo tempo, a beneficiação representa uma etapa intimamente conectada à produção mineral doméstica, em contrates com as etapas subsequentes de refino e manufatura que podem ser supridas com material importado e oferta secundária. Nesse aspecto, considera-se também exclusivamente a oferta mineral primária, ainda que, para alguns materiais, a oferta secundária possa desempenhar papel relevante no médio e longo prazo.

A partir dessa perspectiva, foram identificados os materiais cuja demanda incremental associada ao cumprimento da NDC brasileira supera 10% da produção nacional atual em algum momento durante o período de análise, com base nos dados de produção beneficiada do Anuário Mineral Brasileiro[55] (2024). Os materiais que se enquadram nesse critério são manganês, níquel, grafita, cobre e lítio. No caso do manganês, tanto no cenário RM quanto no cenário DT, esse limiar é ultrapassado entre 2045 e 2050. Para o cobre, a marca de 10% é atingida já em 2030, sendo que, em todos os cenários, a demanda associada à transição energética ultrapassa 40% da produção atual em algum momento do período analisado. No caso do lítio e da grafita, a demanda supera 100% da produção nacional em todos os cenários a partir de 2030. O níquel, por sua vez, ultrapassa esse patamar nos cenários BAU e DT, enquanto no cenário RM ultrapassa a barreira dos 60% da produção atual em 2045. Esses resultados são apresentados nas Figuras 47, 48 e 49.

[55] O anuário mineral brasileiro apresenta dados de produção bruta e produção beneficiada das seguintes substâncias metálicas: Alumínio, Chumbo, Cobre, Columbita-Tantalita, Cromo, Estanho, Ferro, Grafita, Lítio, Manganês, Nióbio, Níquel, Ouro (Concessão e Permissão), Vanádio e Zinco.

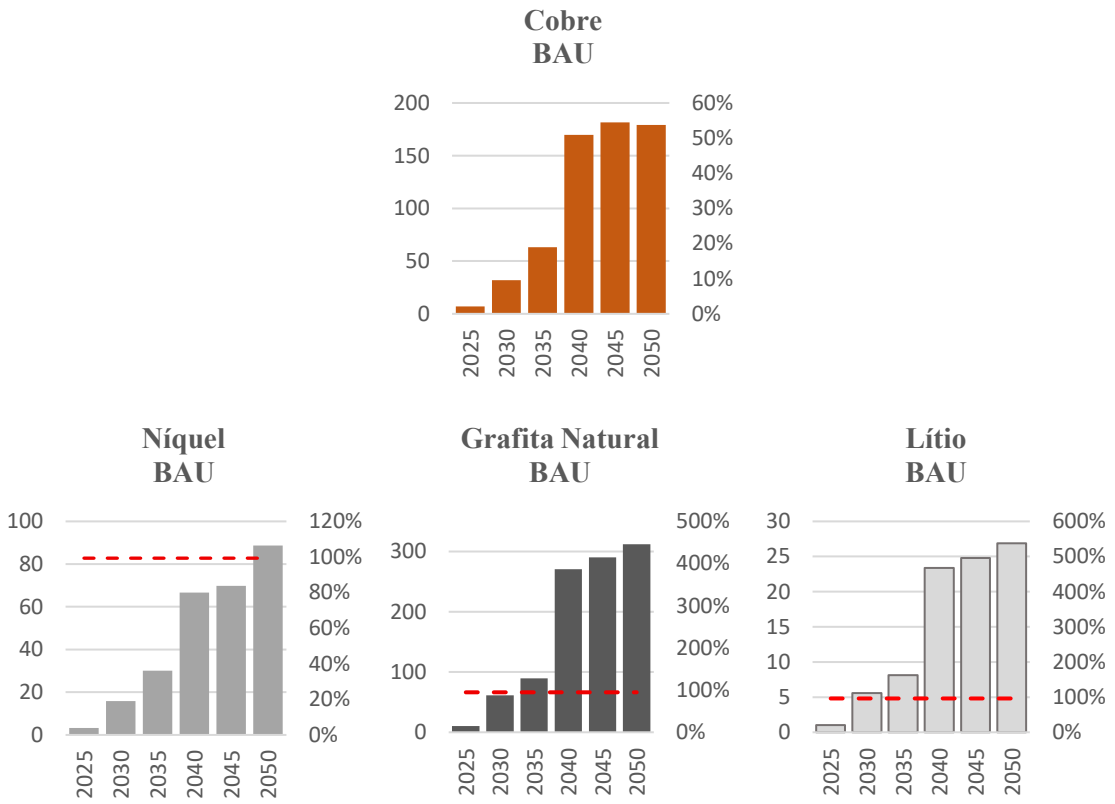


Figura 47 - Materiais cuja demanda incremental supera 10% da produção brasileira em algum momento do período analisado no cenário BAU. Demanda em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Como pode ser observado, do ponto de vista da mineração, atender a essa demanda em território nacional exigirá o desenvolvimento e a escalada de múltiplos projetos de extração e beneficiamento nas próximas décadas. Esse desafio torna-se ainda mais dramático dado os longos prazos característicos do ciclo de desenvolvimento de novas minas. Segundo estudo da S&P GLOBAL (2024), o tempo médio global para o desenvolvimento de uma nova mina é de aproximadamente 15,7 anos. Desse total, cerca de 75% corresponde à parte de exploração mineral, de obtenção das licenças ambientais e a estruturação do financiamento. As demais fases incluem, em média, um ano para a decisão final de investimento e dois anos e destinados à implantação da mina (S&P Global, 2024). No Brasil, esses prazos tendem a ser ainda mais longos, levando, em média, 17,2 anos entre o início da fase de exploração e o comissionamento da mina (S&P GLOBAL, 2025).

Nesse contexto, avançar ao longo da cadeia de valor das tecnologias de baixo carbono no curto e médio prazo impõe um desafio adicional. Além de exigir coordenação de investimentos industriais, expansão da infraestrutura logística, qualificação de mão de

obra e estabilidade regulatória, a insuficiência da extração mineral doméstica pode reforçar a dependência de fornecedores externos. A importação de minérios ou concentrados transfere para o exterior parte dos riscos de acesso aos insumos e aumenta a exposição à volatilidade de preços e a riscos geopolíticos, e pode gerar novos gargalos na etapa de processamento, caso a capacidade mineral doméstica não esteja instalada.

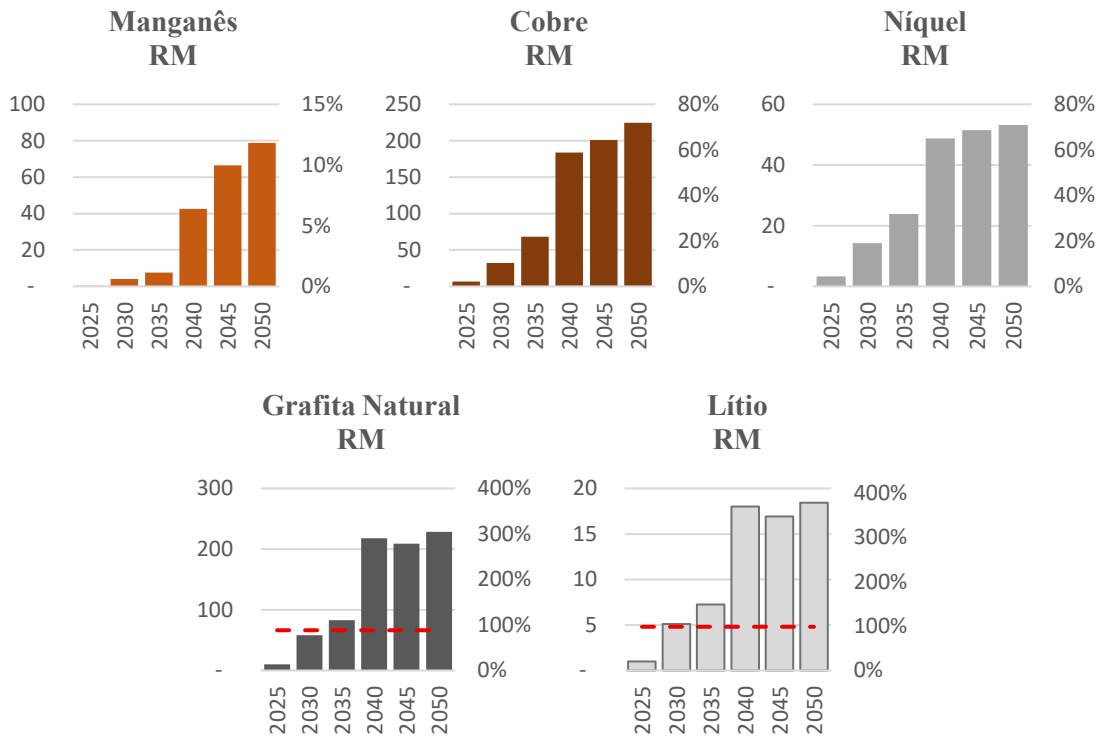


Figura 48- Materiais cuja demanda incremental supera 10% da produção brasileira em algum momento do período analisado no cenário RM. Demanda em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Assim, o longo tempo de desenvolvimento de novas minas se contrapõe à velocidade requerida pela transição energética no que se refere à demanda por materiais críticos, sobretudo a partir de 2035. Esse descompasso representa com maior veemência os riscos de descasamento entre oferta e demanda do ponto de vista nacional, indicando que, para além da deterioração dos termos de troca por não avançar nas cadeias de valor das tecnologias de baixo carbono, o Brasil tende a ser deficitário em relação ao consumo material em grande parte dessas tecnologias. Em última análise, o avanço na produção mineral e a inserção do país nas cadeias produtivas associadas à transição energética precisam ser planejadas desde o início do período analisado, como forma de reduzir o risco de tal descasamento e fortalecer a soberania mineral e tecnológica brasileira. Caso contrário, gargalos no mercado global podem contestar a velocidade e o vigor de muitas

das estratégias brasileiras para a transição energética ao tornar certas tecnologias indisponíveis, seja por falta de oferta, seja por preços proibitivos.

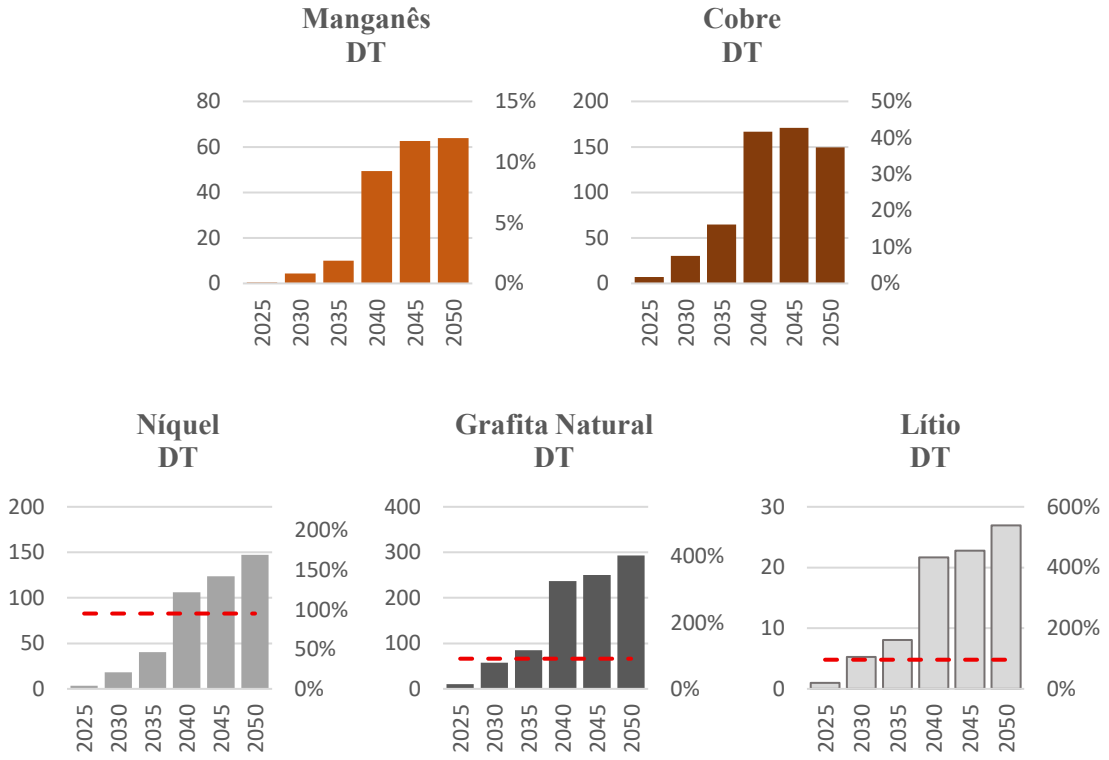


Figura 49 - Materiais cuja demanda incremental supera 10% da produção brasileira em algum momento do período analisado no cenário DT. Demanda em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2.3.1. Demanda incremental vs. Produção global

Para elementos cuja produção nacional é inexistente ou não reportada, a comparação foi realizada com a produção mundial e foram identificados elementos cuja demanda projetada ultrapassaria ao menos 5% da produção mundial, com bases nos dados da Comissão Européia (2025). Nessa categoria, destacam-se os elementos de terras raras e os elementos associados às tecnologias de filmes finos para painéis fotovoltaicos. Cabe ressaltar que estes últimos são obtidos como subprodutos já no processo de refino, uma etapa subsequente ao beneficiamento na cadeia de valor. Observa-se que o telúrio ultrapassa esse limiar em todos os cenários, enquanto índio, gálio e disprósio o fazem nos cenários RM e DT, e neodímio e praseodímio apenas cruzam 5% no cenário DT. Esses resultados evidenciam que, mesmo para materiais de menor demanda absoluta, a combinação entre baixa intensidade de produção global e rápida expansão da demanda pode gerar pressões relevantes sobre as cadeias de suprimento.

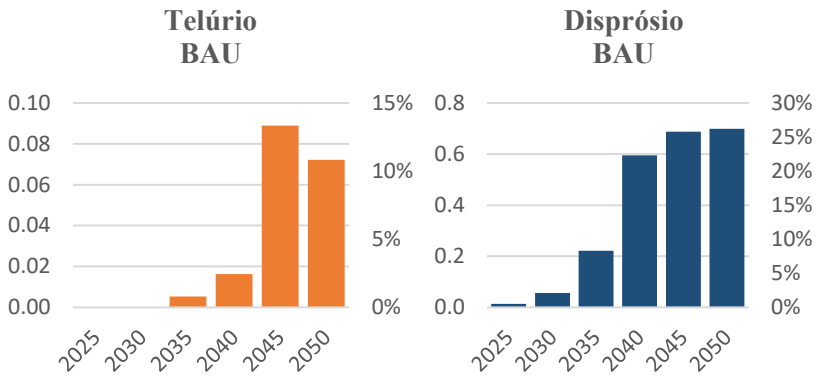


Figura 50 - Materiais cuja demanda incremental supera 5% da produção mundial em algum momento do período analisado no cenário BAU. Demanda em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Interessa notar que os elementos que tiveram demanda incremental relevante em relação a produção global atual são justamente aqueles de maior grau de criticidade. Com exceção do Neodímio, todos apresentam índices de criticidade superior a 100. Dessa forma, todos esses elementos apresentam alto grau de companheirismo mineral, sendo produzidos exclusivamente como subproduto, forte concentração geográfica de produção e mercados relativamente pequenos. Deve-se ressaltar, contudo, que a opacidade desses mercados pode implicar em uma subestimação dos dados de produção reportados.

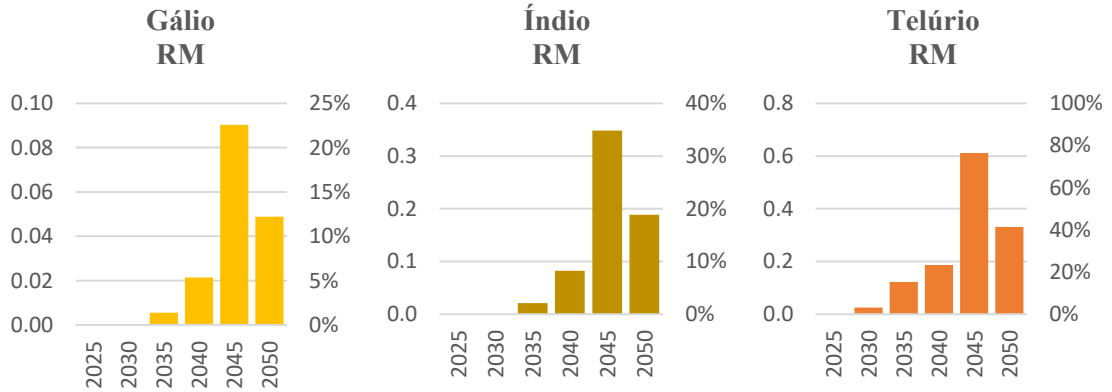


Figura 51- Materiais cuja demanda incremental supera 5% da produção mundial em algum momento do período analisado no cenário RM. Demanda em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

Embora o cenário RM apresente menor criticidade agregada, a presença de elementos associados ao uso de filmes finos nesse recorte – isto é, com elevada demanda incremental relativa à produção global atual – revela uma limitação na metodologia empregada para a definição das tecnologias de menor criticidade. Ainda que escala de criticidade adotada tenha sido adequada para a maioria das tecnologias, a baixíssima

intensidade material dos filmes finos favoreceu sua seleção, mesmo quando associados a elementos com elevada criticidade. Os resultados sugerem, portanto, a necessidade de atribuir maior peso ao tamanho do mercado e à escala absoluta de produção global na avaliação da criticidade, de modo a evitar esse tipo de distorção.

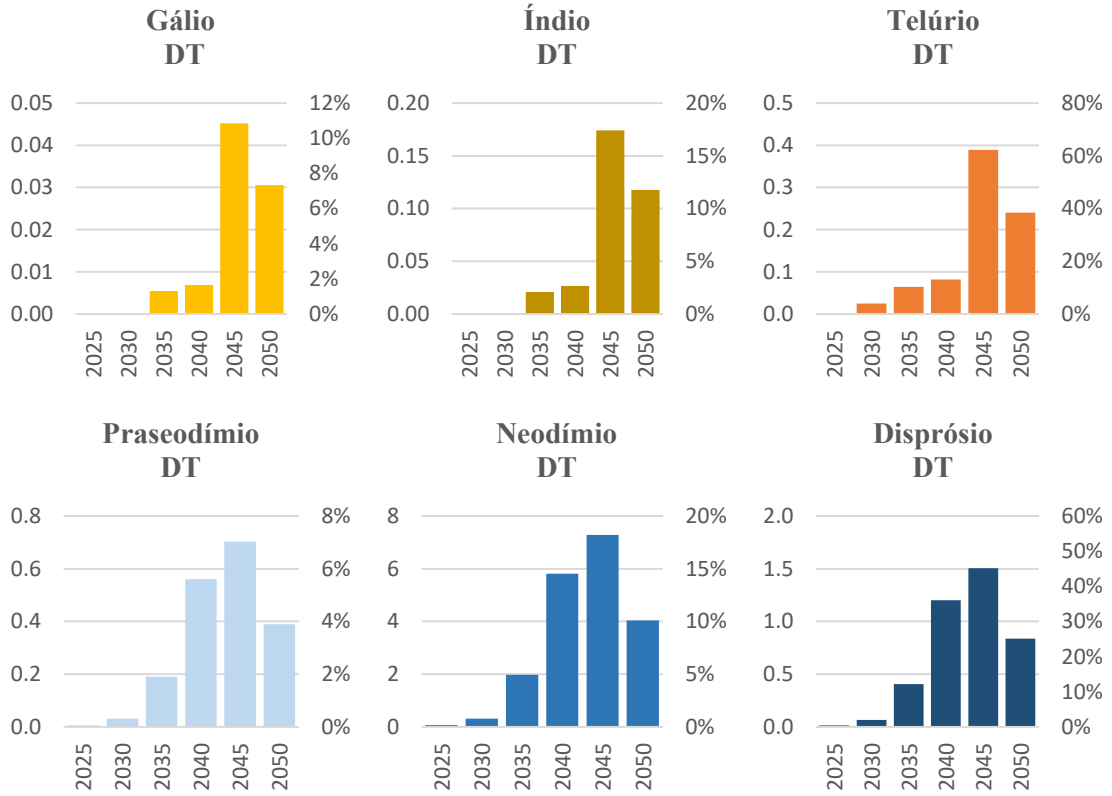


Figura 52 - Materiais cuja demanda incremental supera 5% da produção mundial em algum momento do período analisado no cenário RM. Demanda em milhares de toneladas.

Fonte: Elaboração própria (2025).

5.2.4. Demanda Acumulada vs. Reservas

Já sob a ótica da demanda acumulada e das reservas minerais, o Brasil apresenta uma situação relativamente mais confortável, indicando grande potencial de mitigação dos riscos discutidos no longo prazo para grande parte dos elementos analisados. Entre os elementos reportados pelo Sumário Mineral Brasileiro[56], apenas o cobalto apresenta um quadro mais crítico, no qual a demanda acumulada supera de forma significativa as

[56]O sumário mineral brasileiro apresenta dados dos seguintes minerais: Alumínio, Cobalto, Cobre, Cromo, Estanho, Ferro, Fosfato, Grafita, Lítio, Manganês, Nióbio, Níquel, Ouro, Potássio, Terras Raras, Titânio, Vanádio e Zinco.

reservas atualmente conhecidas (cerca de mil toneladas de Cobalto contido). No caso do lítio, a situação merece atenção, apesar de ser menos drástica. Sua demanda acumulada representa entre 20% e 30% das reservas brasileiras, a depender do cenário considerado.

Importa destacar que o Sumário Mineral Brasileiro reporta reservas provadas e prováveis, em conformidade com padrões internacionais de classificação alinhados ao arcabouço CRIRSCO. Não obstante, como discutido na seção 5.2, as reservas são indicadores dinâmicos, sensíveis a avanços tecnológicos, variações de preço e esforços de exploração. Nesse contexto, destacam-se extensas áreas do território brasileiro – especialmente nas regiões Norte e Centro-Oeste –, as quais ainda apresentam baixo grau de conhecimento geocientífico, carecendo de dados básicos de cartografia, geoquímica, geofísica e informações de superfície, conforme evidenciado pelo Mapa de Densidade do Conhecimento Geocientífico (SGB, 2018; SGB, 2024).

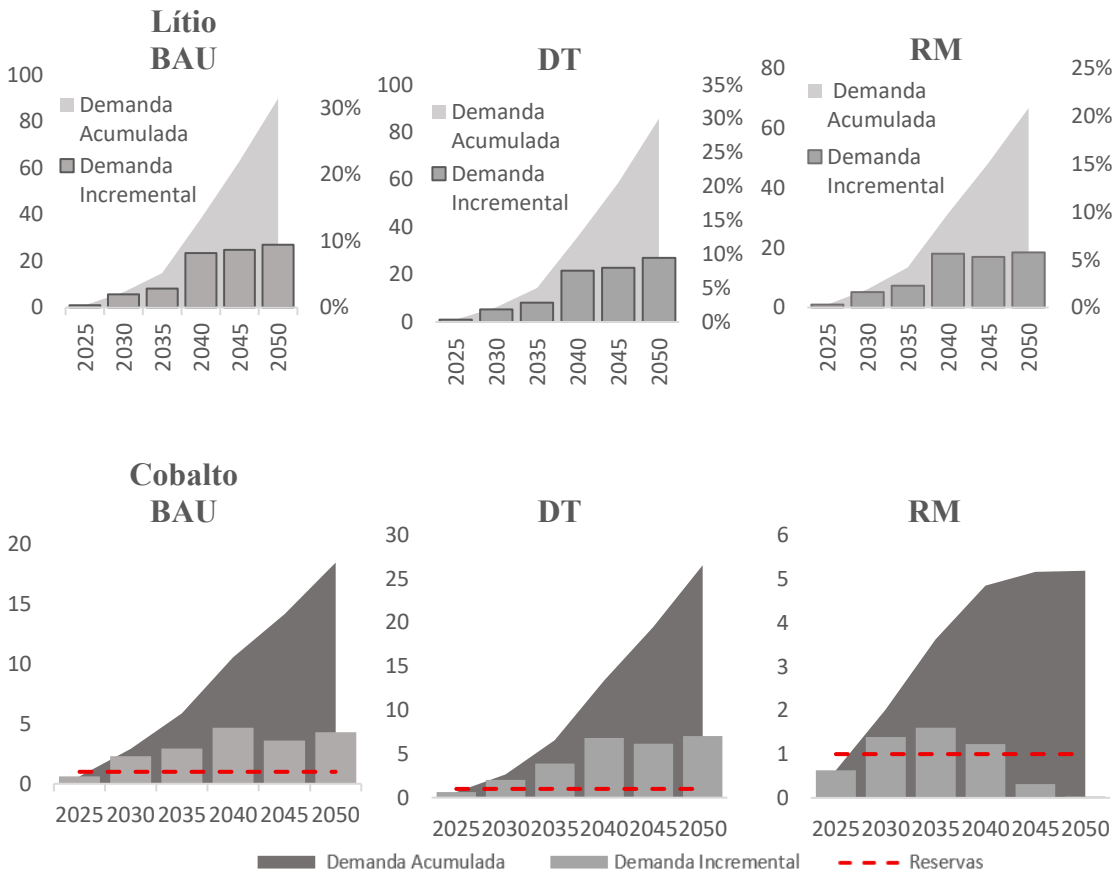


Figura 53 – Comparação da demanda acumulada com as reservas. O eixo vertical direito nos gráficos de lítio representa o percentual das reservas brasileiras.

Fonte**:** Elaboração própria (2025).

Em relação às terras raras, o Brasil detém a segunda maior reserva global, com aproximadamente 11,4 milhões de toneladas de reservas provadas e prováveis. Isso indica

que as reservas brasileiras são mais que suficientes para atender a demanda acumulada para o cumprimento da NDC nacional. No entanto, apesar de o país reportar as reservas desse grupo de elementos, os dados são apresentados de forma agregada, inviabilizando a comparação direta entre a demanda acumulada estimada e as reservas individuais de cada elemento. Esse aspecto reforça a necessidade de maior desagregação e transparência nos dados geológicos, especialmente diante da crescente relevância estratégica desses materiais para a transição energética.

Assim, com exceção do cobalto, os resultados indicam que o Brasil dispõe de base mineral compatível com uma estratégia de aprofundamento da cadeia produtiva das tecnologias de baixo carbono no longo prazo. Há margem não apenas para ampliar a extração, mas também para internalizar etapas de maior valor agregado, articulando a expansão mineral à política industrial e energética. A magnitude da demanda projetada pela transição cria, nesse sentido, um mercado interno potencialmente indutor de investimentos, capaz de sustentar ganhos de escala e aprendizado tecnológico.

Esse potencial, entretanto, depende do avanço do conhecimento geológico, ainda restrito a um conjunto relativamente limitado de substâncias reportadas, e da intensificação dos investimentos em mapeamento e exploração, condição fundamental para reduzir incertezas, atrair capital e sustentar uma inserção qualificada nas cadeias minerais da transição energética. A superação de gargalos estruturais, como os longos prazos de maturação dos projetos minerários, a necessidade de coordenação entre oferta mineral e capacidade industrial e os riscos de descompasso temporal entre produção e demanda incremental tornam-se condições centrais para transformar potencial geológico em capacidade produtiva efetiva.

6. Conclusão

Esta dissertação buscou estimar a demanda de materiais críticos associada ao cumprimento da NDC brasileira e analisar seus desdobramentos sob a ótica da criticidade, dos riscos de oferta e das oportunidades de desenvolvimento produtivo. Os resultados apresentados revelam uma dimensão frequentemente secundarizada no debate climático: a descarbonização é também um processo intensivo em recursos minerais e, portanto, o cumprimento das metas climáticas brasileiras não depende apenas da implantação tecnológica das rotas de baixo carbono, mas da capacidade de organizar, antecipar e coordenar a base material que as sustenta.

Ainda que os diferentes cenários analisados – BAU, RM e DT – compartilhem a mesma trajetória macro das rotas tecnológicas de descarbonização, as escolhas das subtecnologias e dos conversores exercem influência decisiva sobre a composição, a intensidade, o ritmo e a criticidade de suas demandas materiais. Evidenciou-se, nesse sentido, que estratégias de substituição podem reduzir a criticidade agregada da transição energética sem comprometer metas climáticas, ainda que frequentemente impliquem novos trade-offs materiais. Além disso, a noção de que inovação tecnológica automaticamente reduz vulnerabilidades mostrou-se incompleta: dependendo da configuração escolhida, pode haver apenas uma realocação de riscos entre diferentes elementos e cadeias produtivas. Assim, estratégias para a redução da criticidade da transição energética não eliminam dependências materiais e suas vulnerabilidades – elas apenas as reorganizam.

Outra constatação relevante deste estudo é que o cumprimento da NDC brasileira, conforme delineado pela trajetória do modelo BLUES, implica uma expansão material de grande magnitude a partir da década de 2030. Embora a composição da demanda varie entre os cenários, sua estrutura é marcada por forte concentração nos elementos associados à eletrificação do transporte, como Grafita, Cobre, Níquel e Manganês. Não obstante, elementos de menor volume de demanda absoluta, como terras raras, índio, gálio e telúrio podem apresentar pressões significativas em relação a suas ofertas, evidenciando que criticidade não se restringe à magnitude da demanda, mas à interação entre escala de mercado, concentração geográfica e grau de companheirismo mineral.

No que se refere às capacidades domésticas, observa-se, para os minérios produzidos em território nacional, um descompasso significativo entre a produção

mineral atual e a demanda incremental projetada. Configura-se, assim, uma tensão estrutural entre o ritmo acelerado da transição energética e os longos ciclos de maturação característicos da atividade mineradora, os quais dificultam a expansão da oferta em bases par e passu com a demanda. A trajetória incremental indica potenciais gargalos já nas próximas décadas, ainda que a suficiência de reservas não se coloque como restrição efetiva. Em outras palavras, a escassez relevante para a transição brasileira em termos de soberania mineral tende a ser menos de natureza geológica e mais de natureza temporal.

Sob a perspectiva de longo prazo, a análise das reservas provadas e prováveis indica uma posição relativamente favorável ao país para a maioria dos minérios reportados pelo Brasil, com exceção do cobalto. De modo geral, as reservas minerais disponíveis e a elevada demanda material são compatíveis com uma estratégia de inserção mais profunda nas cadeias produtivas associadas à transição energética, sustentada pela robustez da base geológica nacional. Esse cenário coloca o país diante de uma escolha estratégica: limitar-se à condição de fornecedor primário de insumos minerais ou utilizar a expansão da demanda doméstica como vetor de política industrial e tecnológica, promovendo maior agregação de valor. A materialidade da transição, portanto, pode converter-se tanto em fator de vulnerabilidade quanto em oportunidade de desenvolvimento.

A concretização desse potencial, contudo, depende de planejamento estratégico, coordenação institucional e investimentos antecipados que permitam expandir a extração mineral e estruturar capacidades industriais capazes de atender à demanda projetada. No caso específico do cobalto, a limitação relativa das reservas reforça a conveniência de estratégias tecnológicas que reduzam sua dependência estrutural, como a maior adoção de químicas alternativas às baterias da família NMC, a exemplo das LFP e LMFP, nas quais há a ausência desse elemento em sua composição.

Para os demais materiais cujas reservas não são reportadas no Sumário Mineral Brasileiro, a ausência de informações consolidadas não pode ser interpretada como inexistência de potencial geológico, mas sim como evidência de lacunas no conhecimento mineral. Nesse contexto, reforça-se a necessidade de intensificar esforços em pesquisa geológica, mapeamento, prospecção e avaliação de recursos, especialmente em regiões ainda subexploradas do território nacional.

Em última instância, a principal conclusão desta dissertação é que a transição energética não pode ser planejada exclusivamente como um problema de emissões de GEE. Ela deve ser concebida como um projeto sistêmico e integrado, no qual energia, mineração e indústria se entrelaçam. Antecipar essa interdependência é condição necessária para que o Brasil não apenas cumpra sua NDC, mas o faça com maior autonomia estratégica, resiliência produtiva e capacidade de captura de valor.

3.1. Limitações e Recomendações para trabalhos futuros

Embora este trabalho contribua ao estimar a demanda por materiais críticos associada ao cumprimento da NDC brasileira em diferentes cenários, seus resultados dependem de um conjunto de hipóteses subjacentes. As projeções estão condicionadas às trajetórias tecnológicas adotadas, aos parâmetros de intensidade material e às informações disponíveis sobre produção e reservas, elementos dinâmicos e que, portanto, evoluem ao longo do tempo. Avanços e inovações tecnológicas, oscilações de preços ou revisões estatísticas podem modificar de forma significativa as estimativas de demanda e os indicadores de criticidade aqui apresentados. Para além dessas incertezas, as quais vale a pena se deburçar, apresentam-se a seguir algumas limitações do estudo, bem como sugestões de pesquisas futuras voltadas ao aprofundamento e aprimoramento da análise.

Uma primeira limitação refere-se ao fato de a demanda material ter sido estimada em termos de material incorporado nos bens finais, sem conversão para produção mineral primária equivalente. Ao não se considerarem explicitamente as perdas ao longo das etapas de beneficiamento, refino e manufatura, a comparação com a produção mineral pode subestimar a pressão efetiva sobre a oferta. Trabalhos futuros poderiam incorporar coeficientes de rendimento ao longo da cadeia produtiva, permitindo uma comparação mais precisa entre demanda projetada e produção mineral necessária.

Adicionalmente, a análise concentrou-se na demanda associada exclusivamente à transição energética brasileira. Idealmente, deveria ser considerada a demanda total brasileira por cada material, incluindo outros setores da economia que competem pelos mesmos insumos. A incorporação dessa dimensão permitiria avaliar de forma mais abrangente os riscos de deslocamento setorial, efeitos sobre preços relativos e potenciais conflitos de uso.

Em relação à metodologia, destaca-se o uso de uma intensidade material estática. Pode-se, no entanto, avaliar avanços tecnológicos razoáveis que levem a uma evolução

da intensidade material das tecnologias de baixo carbono. Nesse caso, recomenda-se o uso de intensidades materiais dinâmicas que reflitam esse avanço tecnológico.

Outra limitação relevante diz respeito à própria trajetória energética adotada. Embora este estudo tenha explorado diferentes estratégias subtecnológicas dentro de uma mesma trajetória macro de descarbonização, permanece aberta a investigação sobre como cenários alternativos de cumprimento da NDC brasileira – com diferentes combinações de rotas tecnológicas e premissas de evoluções de mundo (SSP) – poderiam alterar de forma estrutural o perfil da demanda material. Assim, recomenda-se a investigação de outros cenários do modelo BLUES que também atendam a NDC brasileira.

No campo das recomendações, destaca-se a necessidade de aprofundar a análise sobre a capacidade da demanda doméstica projetada de atuar como indutora de investimentos. Investigar se a magnitude da expansão associada à transição energética é suficiente para sustentar economias de escala, aprendizado tecnológico e integração vertical nas cadeias de processamento, refino e manufatura constitui agenda central para a formulação de políticas industriais.

Recomenda-se, ainda, a análise de cenários nos quais o cumprimento integral da NDC brasileira não se concretize. A consideração de cenários de menor ambição climática ou de atrasos significativos na implementação das políticas permitiria avaliar como diferentes ritmos de transição afetariam a demanda material, os incentivos ao investimento mineral e as perspectivas de avanço nas cadeias de valor associadas às tecnologias de baixo carbono. A exploração desses extremos ampliaria a compreensão das incertezas estruturais envolvidas, possibilitando avaliar tanto riscos de sobrecapacidade e frustração de investimentos quanto riscos de subinvestimento diante de uma transição acelerada.

Também se recomenda a expansão desta abordagem para a escala global, com base em modelos integrados de avaliação (IAMs) de abrangência mundial, como o COFFEE, combinados com dados de reservas e produção globais. Uma análise dessa natureza permitiria avaliar se determinadas trajetórias de descarbonização poderiam ser efetivamente inviabilizadas por restrições materiais absolutas, eliminando a possibilidade de ajuste via comércio internacional.

Por fim, sugere-se o aprofundamento metodológico na mensuração da criticidade, incorporando de forma mais explícita variáveis como tamanho absoluto de mercado,

elasticidade da oferta, concentração geográfica dinâmica e potencial de reciclagem. A integração entre modelagem energética, economia mineral e geociências ainda oferece amplo espaço para avanços analíticos, sobretudo em um contexto no qual a viabilidade material da transição energética tende a assumir papel cada vez mais estratégico.

7. Referências

AFFLERBACH P., FRIDGEN G., KELLER R., RATHGEBER, A. W., STROBEL, F. The by-product effect on metal markets – New insights to the price behavior of minor metals, Resources Policy, Volume 42, 2014, Pages 35-44, ISSN 0301-4207, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.08.003.

ALONSO E., GREGORY J., FIELD F., KIRCHAIN R. Material Availability and the Supply Chain: Risks, Effects, and Responses. Environmental Science & Technology 2007, 41 (19), 6649–6656. https://doi.org/10.1021/es070159c.

AMROUCHE S.O., REKIOUA D., REKIOUA T., BACHA S., Overview of energy storage in renewable energy systems, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 41, Issue 45, 2016, Pages 20914-20927, ISSN 0360-3199, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.243.

ARAI, H. Metal Storage/Metal Air (Zn, Fe, Al, Mg). In Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing; Elsevier, 2015; pp 337–344. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62616-5.00018-8.

ARMAND M., ORTIZ-VITORIANO, N., OLARTE, J., SALAZAR, A., FERRET, R., 2023, Salt Batteries: Opportunities and applications of storage systems based on sodium nickel chloride batteries, Publication for the committee on Industry, Research and Energy (ITRE), Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament, Luxembourg

AU H., CRESPO-RIBADENEYRA M., TITIRICI M., Beyond Li-ion batteries: performance, materials diversification, and sustainability, One Earth, Volume 5, Issue 3, 2022, Pages 207-211, ISSN 2590-3322, https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.02.014.

BAPTISTA, L. B. C. S. "Aprimoramento do Modelo de Análise Inegrada BLUES e Estudo de Caso para os Shared Socioeconomic Pathways" Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético - Programa de Planejamento Energético - COPPE – UFRJ, 2018, disponível em https://ppe.coppe.ufrj.br/publicacao/aprimoramento-do-modelo-de-analise-integrada-blues-e-estudo-de-caso-para-os-shared-socioeconomic-pathways/

BAPTISTA, L. B C. S. (2025) Comunicação Pessoal.

BARBIER, E. B. The Evolution of Economic Views on Natural Resource Scarcity. Review of Environmental Economics and Policy 2021, 15 (1), 24–44. https://doi.org/10.1086/712926.

BASHIR, M.F. Discovering the evolution of Pollution Haven Hypothesis: A literature review and future research agenda. Environ Sci Pollut Res 29, 48210–48232 (2022). https://doi.org/10.1007/s11356-022-20782-1

BEHRE, CHARLES H. "Mineral Economics and World Politics: A Review." Geographical Review, vol. 30, no. 4, 1940, pp. 676–78. JSTOR, https://doi.org/10.2307/210542.

BERNARD, P.; LIPPERT, M. Nickel–Cadmium and Nickel–Metal Hydride Battery Energy Storage. In Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing; Elsevier, 2015; pp 223–251. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62616-5.00014-0.

BLONDEL, F.; LASKY, S. G. Mineral Reserves and Mineral Resources. Economic Geology 1956, 51 (7), 686–697. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.51.7.686.

BRASIL. (2015). Intended nationally determined contribution towards achieving the objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change. United Nations Framework Convention on Climate Change. Disponível em: https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 94, de 7 de fevereiro de 2022. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2022. Disponível em: https://anmlegis.datalegis.net/action/TematicaAction.php?acao=abrirVinculos&cotematica=15107622&cod_menu=6783&cod_modulo=405

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Primeiro relatório bienal de transparência do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Brasília: MCTI, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/Relatorio_deInventario_NacionalNIR_2024_PORT.pdf

BRASIL DE FATO, 2018 – Propostas de Bolsonaro para o Meio Ambiente colocam o país em risco avisam ativistas. Disponível em:

https://www.brasildefato.com.br/2018/10/16/propostas-de-bolsonaro-para-meio-ambiente-colocam-o-pais-em-risco-avisam-ativistas/

BRITT, A. F., & CZARNOTA, K. (2024). A review of critical mineral resources in Australia. Australian Journal of Earth Sciences, 71(8), 1016–1049. https://doi.org/10.1080/08120099.2024.2430279

BROBST, DONALD A.; PRATT, WALDEN P.; MCKELVEY, V. E. (1973). *Summary of United States mineral resources* (PDF). Washington: United States Department of the Interior, Geological Survey. p. 4. Retrieved 2 September 2021.

BROOKS, D.B. (1965). Supply and Competition in Minor Metals (1st ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315673493

BRUNNÉE, J., & STRECK, C. (2013). The UNFCCC as a negotiation forum: towards common but more differentiated responsibilities. Climate Policy, 13(5), 589–607. https://doi.org/10.1080/14693062.2013.822661

BUCCIARELLI P., HACHE E., MIGNON, V., Evaluating criticality of strategic metals: Are the Herfindahl-Hirschman Index and usual concentration thresholds still relevant? – Energy Economics, Vol. 143, 2025, 108208, ISSN 0140-9883, https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108208.

CALDERON J.L., SMITH N.M., BAZILIAN M.D., HOLLEY E., Critical mineral demand estimates for low-carbon technologies: What do they tell us and how can they evolve?, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 189, Part A, 2024, 113938, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113938.

CALVO, G., MUDD, G., VALERO, A., & VALERO, A. (2016). Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? *Resources*, *5*(4), 36. https://doi.org/10.3390/resources5040036

CALVO G., VALERO A., VALERO A., Assessing maximum production peak and resource availability of non-fuel mineral resources: Analyzing the influence of extractable global resources, Resources, Conservation and Recycling, Volume 125, 2017, Pages 208-217, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.009.

CAO Z., MAHMOUDI A., KAHOURZADE S., SOONG W. L., "An Overview of Electric Motors for Electric Vehicles," 2021 31st Australasian Universities Power

Engineering Conference (AUPEC), Perth, Australia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/AUPEC52110.2021.9597739.

CASSIR, M., MELÉNDEZ-CEBALLOS, A., RINGUEDÉ, A., & LAIR, V. (2016). Molten carbonate fuel cells. In Compendium of Hydrogen Energy (pp. 71–87). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-363-8.00003-7

CBRR (Comissão Brasileira de Recursos e Reservas). Guia CBRR para Declaração de Informações de Exploração, Recursos Minerais e Reservas Minerais. Brasília, 2022. Disponível em: https://cbrr.org.br/wp-content/uploads/2025/09/guia_declaracao.pdf.

CEBRI, Neutralidade de carbono até 2050: Cenários para uma transição eficiente no Brasil., 2023. Disponível em: https://cebri.org/br/doc/309/neutralidade-de-carbono-ate-2050-cenarios-para-uma-transicao-eficiente-no-brasil

CEBRI, Programa de Transição Energética – Fase 2: Relatório Executivo., 2025. Disponível em: https://cebri.org/br/doc/397/relatorio-executivo-brasil-em-trajetorias-sustentaveis-caminhos-de-competitividade-para-a-descarbonizacao

CHANG, J., WANG, G., CHANG, X. *et al.* Interface synergism and engineering of Pd/Co@N-C for direct ethanol fuel cells. *Nat Commun* **14**, 1346 (2023). https://doi.org/10.1038/s41467-023-37011-z

CHARLES, N., LEFEBVRE, G., TULOUP, R., CARREAUD, A., BOUBAULT, A., SERRAND, A.-S., PICAULT, M., PIGUET, V., MANZIN, V., DESWARTE, F., & AUPOIL, J. (2023). Mineral Resource Abundance: An Assessment Methodology for a Responsible Use of Mineral Raw Materials in Downstream Industries. *Sustainability*, *15*(24), 16783. https://doi.org/10.3390/su152416783

CHENG M., ZHU Y., "The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review", Energy Conversion and Management, Volume 88, 2014, Pages 332-347, ISSN 0196-8904.

CLARKE L., K. JIANG, K. AKIMOTO, M. BABIKER, G. BLANFORD, K. FISHER-VANDEN, J.-C. HOURCADE, V. KREY, E. KRIEGLER, A. LÖSCHEL, D. MCCOLLUM, S. PALTSEV, S. ROSE, P.R. SHUKLA, M. TAVONI, B.C.C. VAN DER ZWAAN, AND D.P. VAN VUUREN, 2014: Assessing Transformation Pathways. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III

to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

COLLINS, R. 2020. Copper Demand in Electric Traction Motors 2020-2030. IdTechEx Research. Disponível em: https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2020/03/EV-Motors.pdf

COMISSÃO EUROPEIA, 2025 – Raw Material Information System. Disponível em: https://rmis.jrc.ec.europa.eu/rmp

COTRINA-TEATINO M., MARQUINA-ARAUJO J., Hotelling rule in non-renewable resources: A bibliometric and systematic literature review analysis, Resources Policy, Volume 98, 2024, 105342, ISSN 0301-4207, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105342.

CORRELJÉ A., Energy systems – making energy services — Handbook on the Geopolitics of the Energy Transition, Ed. Daniel Scholten; Collection: Political Science and Public Policy, 2023, pages: 44-66, https://doi.org/10.4337/9781800370432.00008

CPI. 2024. Global Landscape of Climate Finance 2024: Insights for COP 29. Disponível em: climatepolicyinitiative.org/publication/global-landscape-of-climate-finance-2024

CUNHA R, MISSEMER A. The Hotelling Rule in Non-Renewable Resource Economics: A Reassessment. Canadian Journal of Economics, 2020, 53 (2), pp.800-820. https://doi.org/10.1111/caje.12444ff.

DE SA, P. Mining and sustainable development: territorializing the mining industry. Miner Econ 32, 131–143 (2019). https://doi.org/10.1007/s13563-018-0149-8

DENG, D. (2015), Li-ion batteries: basics, progress, and challenges. Energy Sci Eng, 3: 385-418. https://doi.org/10.1002/ese3.95

DEPARTMENT OF ENERGY. (2023). 2023 critical materials assessment. Disponível em: https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-05/2023-critical-materials-assessment.pdf

DEPARTMENT OF ENERGY, 2025 – “Cadmium Telluride” Disponível em: https://www.energy.gov/eere/solar/cadmium-telluride

DEPARTMENT OF ENERGY, 2025b – “Perovskite-solar-cells” Disponível em: https://www.energy.gov/eere/solar/perovskite-solar-cells

DESALEGN B., GEBEYEHU D., TAMRAT B., “Wind energy conversion technologies and engineering approaches to enhancing wind power generation: A review”, Heliyon, Volume 8, Issue 11, 2022, e11263, ISSN 2405-8440, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11263.

DESAI, P. (2023), Explainer: Inside the opaque world of minor metals pricing – Reuters. Disponível em: https://www.reuters.com/markets/commodities/inside-opaque-world-minor-metals-pricing-2023-07-06/

DIETZ, S.; SETZER, J.; HIGHAM, C.;CHAN, T.; WALKER-CRAWFORD, N.; VENMANS, F., Translating climate science into legal standards: Lessons from the Milieudefensie v. Shell case. Science 391, 26-29 (2026). DOI:10.1126/science.adz4857

DING, Y.; CANO, Z. P.; YU, A.; LU, J.; CHEN, Z. Automotive Li-Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives. Electrochemical Energy Reviews 2019, 2 (1), 1–28. https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z.

DIUANA, F. A. (2025) Comunicação pessoal.

DOETSCH, C., & BURFEIND, J. (2016). Vanadium Redox Flow Batteries. In Storing Energy (pp. 227–246). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803440-8.00012-9

DUCLOS, J. S.; OTTO, J. P.; KONITZER, D. G., Design in an era of Constrained Resources, Mechanical Engineering, 2010, https://doi.org/10.1115/1.2010-Sep-3

EAPEN, D. E., SUSEENDIRAN, S. R., & RENGASWAMY, R. (2016). Phosphoric acid fuel cells. In Compendium of Hydrogen Energy (pp. 57–70). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-363-8.00002-5

EPE 2023 - Caderno de Tecnologias de Geração 2023 - Evolução dos projetos cadastrados nos Leilões de Energia e suas Características Técnicas. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-745/Caderno%20de%20Tecnologias%20de%20Gera%C3%A7%C3%A3o%202023.pdf

EPOWERBAY, 2022 – Fabrincantes de Aerogeradores: Os maiores em operação no Brasil -2022. Disponível em: https://www.epowerbay.com/single-post/fabricantes-de-aerogeradores-os-maiores-em-operacao-no-brasil-2022

ERICSSON, M. Changing locus of mining. *Miner Econ* **35**, 1–2 (2022). https://doi.org/10.1007/s13563-022-00303-9

ERICSSON, M., LÖF, O. & LÖF, A. Locus of control over global mine production– developments between 1985 and 2018 against a historical background. *Miner Econ* **37**, 633–643 (2024). https://doi.org/10.1007/s13563-024-00454-x

EUROPEAN ASSOCIATION FOR STORAGE OF ENERGY 2025 – Energy Storage Technology Descriptions. Disponível em: https://energystorageeurope.eu/why-energy-storage/technologies/

EUROPEAN COMMISSION, (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report. ET-07-23-116-EN-N, ISBN: 978-92-68-00414-2, DOI: 10.2873/725585

EVRO S., AJUMOBI A., MAYON D., TOMOMEWO O. S., Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies, Future Batteries, Volume 4, 2024, 100007, ISSN 2950-2640, https://doi.org/10.1016/j.fub.2024.100007.

FANG, T., VAIRIN, C., VON JOUANNE, A., AGAMLOH, E., & YOKOCHI, A. (2024). Review of Fuel-Cell Electric Vehicles. *Energies*, *17*(9), 2160. https://doi.org/10.3390/en17092160

FARO, M. L., TROCINO, S., ZIGNANI, S. C., & ARICÒ, A. S. (2016). Solid oxide fuel cells. In Compendium of Hydrogen Energy (pp. 89–114). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-363-8.00004-9

FISHER-VANDEN, K.; WEYANT, J. The Evolution of Integrated Assessment: Developing the Next Generation of Use-Inspired Integrated Assessment Tools. Annual

Review of Resource Economics 2020, 12 (1), 471–487. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-110119-030314.

FIZAINE, F. Minor metals and organized markets: News highlights about the consequences of establishing a futures market in a thin market with a dual trading price system, Resources Policy, Volume 46, Part 2, 2015, Pages 59-70, ISSN 0301-4207, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.08.004.

FLEISCHER, M. The Abundance and Distribution of the Chemical Elements in the Earth's Crust. Journal of Chemical Education 1954, 31 (9), 446. https://doi.org/10.1021/ed031p446.

FRAUNHOFER INSTITUTE, 2025 - Fraunhofer ISE: Photovoltaics Report, updated: 29 May 2025, https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html.

FRISCH, M. Modeling Climate Policies: A Critical Look at Integrated Assessment Models. Philos. Technol. **26**, 117–137 (2013). https://doi.org/10.1007/s13347-013-0099-6

FU, B.; LI, J.; GASSER, T.; CIAIS P.; PIAO S.; TAO, S.; SHEN, G.; LAI, U.; HAN, L; LI, B. Climate Warming Mitigation from Nationally Determined Contributions. Adv. Atmos. Sci. **39**, 1217–1228 (2022). https://doi.org/10.1007/s00376-022-1396-8

FÜSSEL, H. Modeling Impacts and Adaptation in Global IAMs. WIREs Climate Change 2010, 1 (2), 288–303. https://doi.org/10.1002/wcc.40.

GABRIEL E., MA C., GRAFF K., CONRADO A., HOU D., XIONG H., Heterostructure engineering in electrode materials for sodium-ion batteries: Recent progress and perspectives, eScience, Volume 3, Issue 5, 2023, 100139, ISSN 2667-1417, https://doi.org/10.1016/j.esci.2023.100139

GEMECHU, E.D., SONNEMANN, G. & YOUNG, S.B. Geopolitical-related supply risk assessment as a complement to environmental impact assessment: the case of electric vehicles. Int J Life Cycle Assess 22, 31–39 (2017). https://doi.org/10.1007/s11367-015-0917-4

GEORGESCU-ROEGEN, N. (1971). *The entropy law and the economic process*. Harvard University Press. https://doi.org/10.4159/harvard.9780674281653.

GLÖSER S, TERCERO ESPINOZA L, GANDENBERGER C, FAULSTICH M (2015) - Raw material criticality in the context of classical risk assessment. Resource Policy 44:35–46. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2014.12.003

GOIKOLEA, E., PALOMARES, V., WANG, S., DE LARRAMENDI, I. R., GUO, X., WANG, G., & ROJO, T. (2020). Na-Ion Batteries—Approaching Old and New Challenges. Advanced Energy Materials, 10(44). Portico. https://doi.org/10.1002/aenm.202002055

GOLDWIND 2024 – Goldwind's Wind Equipment Manufacturing Base in Brazil Officially Launched. Disponível em: https://www.goldwind.com/en/news/focus-101419528951239577 6/

GOODENOUGH, J. B.; KIM, Y. Challenges for Rechargeable Li Batteries. Chemistry of Materials 2009, 22 (3), 587–603. https://doi.org/10.1021/cm901452z.

GOODENOUGH, J.B. Rechargeable batteries: challenges old and new. *J Solid State Electrochem* **16**, 2019–2029 (2012). https://doi.org/10.1007/s10008-012-1751-2

GOODENOUGH, J. B. E PARK, K. The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective. Journal of the American Chemical Society, 2013, 135,4,1167-1176 https://doi.org/10.1021/ja3091438

GRAEDEL, T.E., ERDMANN, L. Will metal scarcity impede routine industrial use?. *MRS Bulletin* **37**, 325–331 (2012). https://doi.org/10.1557/mrs.2012.34

GRAEDEL, T. E. AND N. T. NASSAR. 2013. The criticality of metals: A perspective for geologists. In Ore deposits in an evolving earth, edited by G. R. T. Jenkin et al. London: Geological Society.

GRAEDEL T.E.; HARPER E.M.; NASSAR N.T.; RECK B.K., (2015). On the materials basis of modern society, Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 112 (20) 6295-6300, https://doi.org/10.1073/pnas.1312752110

GRAEDEL T. E., HARPER E. M., NASSAR N. T., NUSS P., RECK B.K. , Criticality of metals and metalloids, Proceedings National Academy of Sciences (2015). U.S.A. 112 (14) 4257-4262, https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112

HABIB K, WENZEL H (2016) Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective– using the case of direct-drive wind turbines. J Clean Prod 112:3852–3863. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.064

HAGLUND D. G., Strategic minerals: A conceptual analysis, Resources Policy, Volume 10, Issue 3, 1984, Pages 146-152, ISSN 0301-4207, https://doi.org/10.1016/0301-4207(84)90029-1

HAMADA, A.T., ORHAN, M.F., KANNAN, A.M, Alkaline fuel cells: Status and prospects, Energy Reports, Volume 9, 2023, Pages 6396-6418, ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.05.276.

HAXEL G., HENDRIX J., ORRIS G. (2002), Rare Earth Elements – Critical Resources for High Technology, U.S. Geological Survey, 2002, Fact Sheet 087-02, disponível em: https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/rare-earths-statistics-and-information

HELBIG C., BRADSHAW A. M., WIETSCHEL L., THORENZ A.,TUMA A., Supply risks associated with lithium-ion battery materials, Journal of Cleaner Production, Volume 172, 2018, Pages 274-286, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.122.

HOLLNAICHER, S. (2025). Objective Assessments with Value-laden Models. In: Assessing Feasibility with Value-laden Models. J.B. Metzler, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-70714-2_7

HU X., WANG C., ELSHKAKI A., Material-energy Nexus: A systematic literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 192, 2024, 114217, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114217.

HUDDLE F., The Evolving National Policy for Materials. Science 191,654-659 (1976). DOI:10.1126/science.191.4228.654.

HUMPHREYS D. – Minerals: Industry History and Fault Lines of Conflict Global Resources, 2013

IAMCwiki, 2025 – Model documentation: BLUES., Disponível em: https://www.iamcdocumentation.eu/Model_Documentation_-_BLUES

IEA (2021), The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, IEA, Paris Disponível em: https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions, Licence: CC BY 4.0

IEA (2023), Global EV Outlook 2023, IEA, Paris. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023

IEA (2025). ETP Clean Energy Technology Guide. Paris, 2025b. Disponível em: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide

IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

IPCC, 2022: Annex III: Scenarios and modelling methods [GUIVARCH, C., E. KRIEGLER, J. PORTUGAL-PEREIRA, V. BOSETTI, J. EDMONDS, M. FISCHEDICK, P. HAVLÍK, P. JARAMILLO, V. KREY, F. LECOCQ, A. LUCENA, M. MEINSHAUSEN, S. MIRASGEDIS, B. O'NEILL, G.P. PETERS, J. ROGELJ, S. ROSE, Y. SAHEB, G. STRBAC, A. HAMMER STRØMMAN, D.P. VAN VUUREN, N. ZHOU (eds)]. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.022

IRENA and NUPI (2024), Constructing a ranking of critical materials for the global energy transition, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.

JEWELL, J.; CHERP, A. On the Political Feasibility of Climate Change Mitigation Pathways: Is It Too Late to Keep Warming below 1.5°C? WIREs Climate Change 2019, 11 (1). https://doi.org/10.1002/wcc.621.

JOGMEC, 2025 – History of JOGMEC. Disponível em: https://www.jogmec.go.jp/english/about/about003.html

KIGGINS, R.D. (2015). The Strategic and Security Implications of Rare Earths. In: Kiggins, R.D. (eds) The Political Economy of Rare Earth Elements. International

Political Economy Series. Palgrave Macmillan, London. https://doi.org/10.1057/9781137364241_1

KLEIN, R.J.T., S. HUQ, F. DENTON, T.E. DOWNING, R.G. RICHELS, J.B. ROBINSON, F.L. Toth, 2007: Inter-relationships between adaptation and mitigation. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 745-777.

KNORR, KLAUS. War Potential of Nations. Princeton University Press, 1956. JSTOR, http://www.jstor.org/stable/j.ctt183prtj

DE KONING A., KLEIJN R., HUPPES G., SPRECHER B., VAN ENGELEN G., TUKKER A., Metal supply constraints for a low-carbon economy?, Resources, Conservation and Recycling, Volume 129, 2018, Pages 202-208, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.040.

ILZSG, 2023 - International Lead and Zinc Study Group. *World Lead Factbook 2023*. International Lead and Zinc Study Group, 2023.

İNCI M., BÜYÜK M., DEMIR M.K., İLBEY G., A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters, energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 137, 2021, 110648, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110648.

IQBAL, M., BENMOUNA, A., BECHERIF, M., & MEKHILEF, S. (2023). Survey on Battery Technologies and Modeling Methods for Electric Vehicles. *Batteries*, *9*(3), 185. https://doi.org/10.3390/batteries9030185

JAMAL T., SHAFIULLAH G.M., DAWOOD F., KAUR A., ARIF M.T., PUGAZHENDHI R., ELAVARASAN R.M., AHMED S.M., Fuelling the future: An in-depth review of recent trends, challenges and opportunities of hydrogen fuel cell for a sustainable hydrogen economy, Energy Reports, Volume 10, 2023, Pages 2103-2127, ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.011.

KANDHASAMY M., DUVARAGAN B. K., KAMARAJ S. AND SHANMUGAM G. (2024) An Overview on Classification of Energy Storage Systems.

Materials for Boosting Energy Storage. Volume 2: Advances in Sustainable Energy Technologies, 1-25. doi:10.1021/bk-2024-1484.ch001

KESHAN H., J. THORNBURG AND T. S. USTUN, "Comparison of lead-acid and lithium ion batteries for stationary storage in off-grid energy systems," *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1049/cp.2016.1287.

KOPPELAAR, R.H.E.M., KOPPELAAR, H. The Ore Grade and Depth Influence on Copper Energy Inputs. *Biophys Econ Resour Qual* **1**, 11 (2016). https://doi.org/10.1007/s41247-016-0012-x

KUBOTA, K.; DAHBI, M.; HOSAKA, T.; KUMAKURA, S.; KOMABA, S. Towards K-Ion and Na-Ion Batteries as "Beyond Li-Ion." The Chemical Record 2018, 18 (4), 459–479. https://doi.org/10.1002/tcr.201700057.

KURZWEIL, P. Lithium Battery Energy Storage. In Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing; Elsevier, 2015; pp 269–307. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62616-5.00016-4.

LAPKO Y., TRUCCO P., NUUR C. The business perspective on materials criticality: Evidence from manufacturers, Resources Policy, Volume 50, 2016, Pages 93-107, ISSN 0301-4207, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.09.001.

LAURENT B., LOUVET G., SOLÉ-POMIES R., VIOLLE A., What makes minerals critical? Problematizing sovereignty in times of crisis, The Extractive Industries and Society, Volume 24, 2025, 101720, ISSN 2214-790X, https://doi.org/10.1016/j.exis.2025.101720.

LI, M.; LU, J.; CHEN, z. Amine, K. 30 Years of Lithium-Ion Batteries. Advanced Materials, 2018 https://doi.org/10.1002/adma.201800561

LIU W., TOBIAS PLACKE T., CHAU K.T., Overview of batteries and battery management for electric vehicles, Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 4058-4084, ISSN 2352-4847, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.016.

LYNAS M., HOULTON B. Z., PERRY S., (2021) Greater than 99% consensus on human caused climate change in the peer-reviewed scientific literature, Environmental Research Letters, 16, 114005, doi: 10.1088/1748-9326/ac2966

MADEMLIS G., LIU Y., TANG J., BOSCAGLIA L. AND SHARMA N., "Performance Evaluation of Electrically Excited Synchronous Machine compared to PMSM for High-Power Traction Drives," 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Gothenburg, Sweden, 2020, pp. 1793-1799, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270852

MAGDALENA R., VALERO A., PALACIOS J., AND VALERO A. (2021) "Mining energy consumption as a function of ore grade decline: the case of lead and zinc," *Journal of Sustainable Mining*: Vol. 20 : Iss. 2 , Article 5. Available at: https://doi.org/10.46873/2300-3960.1060

MÅNBERGER, A.; STENQVIST, B. Global Metal Flows in the Renewable Energy Transition: Exploring the Effects of Substitutes, Technological Mix and Development. Energy Policy 2018, 119, 226–241. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.056.

MARIE, J.; GRIFFORD, S., (2023). Developments in Lithium-Ion Battery Cathodes. The Faraday Institution. Issue 18. Disp. em: https://www.faraday.ac.uk/wp-content/uploads/2023/09/Faraday_Insights_18_FINAL.pdg

MAULL, H. W., South Africa's minerals: the Achilles heel of Western economic security? International Affairs, 1986

MAXWELL P., Transparent and opaque pricing: The interesting case of lithium, Resources Policy, Volume 45, 2015, Pages 92-97, ISSN 0301-4207, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.03.007.

MAY, G. J.; DAVIDSON, A.; MONAHOV, B. Lead Batteries for Utility Energy Storage: A Review. Journal of Energy Storage 2018, 15, 145–157. https://doi.org/10.1016/j.est.2017.11.008

MCKELVEY, V. E. (1972). Mineral Resource Estimates and Public Policy: Better methods for estimating the magnitude of potential mineral resources are needed to provide the knowledge that should guide the design of many key public policies. *American Scientist*, *60*(1), 32–40. http://www.jstor.org/stable/27842943

MCLAREN, D., MARKUSSON, N. The co-evolution of technological promises, modelling, policies and climate change targets. Nat. Clim. Chang. **10**, 392–397 (2020). https://doi.org/10.1038/s41558-020-0740-1

MCTI, 2025 – Painel de dados por UF do setor LULUCF. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/painel-de-dados-por-uf-do-setor-lulucf

MCNULTY, B. A.; JOWITT, S.M. Byproduct critical metal supply and demand and implications for the energy transition: A case study of tellurium supply and CdTe PV demand, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 168, 2022, 112838, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112838

MELO, F,: A geopolítica das terras raras;Rev. Carta Inter., Belo Horizonte, v. 12, n. 2, 2017, p. 219-243 doi: 10.21530/ci.v12n2.2017.634

MENDELSOHN, R. Integrated Assessment And Climate Change. Climate Change Economics 2020, 11 (04), 2040004. https://doi.org/10.1142/s2010007820400047.

MITALI, J.; DHINAKARAN, S.; MOHAMAD, A.A. Energy Storage Systems: a review. Energy Storage and Saving, v. 1, p. 166–216, 2022 https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.07.002.

MOHAMMADI, S.; KAKAIE, R.; ATAEI, M.; POURZAMANI, E. Determination of the Optimum Cut-off Grades and Production Scheduling in Multi-Product Open Pit Mines Using Imperialist Competitive Algorithm (ICA). Resources Policy 2017, 51, 39–48. https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.11.005.

MÖLLER, R., CEPNIK C., AZEVEDO M., CAPMAGNOL, N. 2024 – The battery chemistries powering the future of electric vehicles. McKinsey & Company. Automotive & Assembly Practice. Disponível em: https://www.mckinsey.com.br/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-battery-chemistries-powering-the-future-of-electric-vehicles#/

MOSELEY, P. T.; RAND, D. A. J. High-Temperature Sodium Batteries for Energy Storage. In Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing; Elsevier, 2015; pp 253–268. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62616-5.00015-2

MUDD, G.; JOSSO, P.; SHAW, R.; LUCE, A.; SINGH, N.; HORN, S.; BIDE, T.; CURRIE, D.; ELLIOTT, H.; GRANT, H.; HALKES, R.; IDOINE, N.; MITCHELL, C. WATKINS, I.; PRICE, F.; PETAVRATZI, E.. 2024 *UK 2024 criticality*

assessment. Nottingham, UK, British Geological Survey, 250pp. Disponível em: https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/538471/

NADEEM F., HUSSAIN S.M.S, TIWARI P.K. GOSWAMI A.K., Ustun T. S., Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems. IEEE Acess, v. 7, 2019.

NAPO S., TATOUTCHOUP D., SONDO E., Exploring mining extraction dynamics in Africa: A Hotelling model perspective with non-linear costs, Resources Policy, Volume 110, 2025, 105745, ISSN 0301-4207, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105745.

NASSAR, N. T. Limitations to elemental substitution as exemplified by the platinum-group metals. Green Chem. 10.1039/C4GC02197E (2015). DOI: https://doi.org/10.1039/C4GC02197E

NASSAR, N. T.; GRAEDEL, T.E.; HARPER, E.M., By-product metals are technologically essential but have problematic supply.Sci. Adv.1,e1400180 (2015). DOI:10.1126/sciadv.1400180

NASSAR, N. T.; DU, X.; GRAEDEL, T. E. Criticality of the Rare Earth Elements. Journal of Industrial Ecology 2015, 19 (6), 1044–1054. https://doi.org/10.1111/jiec.12237.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 2008. Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/12034.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (b). 2008. Managing Materials for a Twenty-first Century Military. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/12028.

NAVINKUMAR T.M., BHARATIRAJA C., Sustainable hydrogen energy fuel cell electric vehicles: A critical review of system components and innovative development recommendations, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 215, 2025, 115601, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115601.

NGUYEN, V. N., BLUM, L. (2016). Reversible fuel cells. In Compendium of Hydrogen Energy (pp. 115–145). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-363-8.00005-0

NICHOLS, C. 2024 – Stationary Energy Storage: Innovations in Li-ion Battery Technologies. IdTechEx. Disponível em: https://www.idtechex.com/en/research-article/stationary-energy-storage-innovations-in-li-ion-battery-technologies/31736

NREL, 2025 "Best Research – Cell Efficiency Chart" – Disponível em: https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency

NUGRAHA Y. U., ASFANI D. A., NEGARA I. M., AZIZ M. AND YUNIARTO M. N., "Technology Review of Electric Motor for Hybrid-Electric Vehicle," TENCON 2021 - 2021 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Auckland, New Zealand, 2021, pp. 777-781, doi: 10.1109/TENCON54134.2021.9707371.

NUNES, F.S.M., SOARES-FILHO, B.S., OLIVEIRA, A.R. et al. Lessons from the historical dynamics of environmental law enforcement in the Brazilian Amazon. Sci Rep 14, 1828 (2024). https://doi.org/10.1038/s41598-024-52180-7

NZEREOGU P.U., OMAH A.D., EZEMA F.I., IWUOHA E.I., NWANYA A.C., Anode materials for lithium-ion batteries: A review, Applied Surface Science Advances, Volume 9, 2022, 100233, ISSN 2666-5239, https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2022.100233.

ORBONS K, VAN VUUREN DP, AMBROSIO G, et al. A review of existing model-based scenarios achieving SDGs: progress and challenges. Global Sustainability. 2024;7:e3. doi:10.1017/sus.2023.20

OREFICE, M., MANNI, F.M., PIERRI, E., BOBBA, S., GAUDILLAT, P., VACCARI, M. AND MATHIEUX, F., Technical suggestions for the rules for calculation and verification of rates for recycling efficiency and recovery of materials of waste batteries, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024, JRC137139. https://data.europa.eu/doi/10.2760/9781567

ORESKES, N. (2004). The Scientific Consensus on Climate Change. Science, 306(5702), 1686–1686. https://doi.org/10.1126/science.1103618

PARK, S., SHAO, Y., LIU, J., & WANG, Y. (2012). Oxygen electrocatalysts for water electrolyzers and reversible fuel cells: status and perspective. Energy & Environmental Science, 5(11), 9331. https://doi.org/10.1039/c2ee22554a

PARLAMENTO EUROPEU, 2013 – MEPs ban cadmium from power tool batteries and mercury from button cells. Press Release. Disponível em: https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20131004IPR21519/meps-ban-cadmium-from-power-tool-batteries-and-mercury-from-button-cells#:~:text=The%20new%20rules%20will%20allow,Ordinary%20Legislative%20Procedure)%201st%20reading

POLLET, B. G., FRANCO, A. A., SU, H., LIANG, H., & PASUPATHI, S. (2016). Proton exchange membrane fuel cells. In Compendium of Hydrogen Energy (pp. 3–56). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-363-8.00001-3

PRIESTER M., ERICSSON M., DOLEGA P. *et al.* Mineral grades: an important indicator for environmental impact of mineral exploitation. Miner Econ **32**, 49–73 (2019). https://doi.org/10.1007/s13563-018-00168-x

QASEM, N. A. A., ABDULRAHMAN, G. A. Q., A Recent Comprehensive Review of Fuel Cells: History, Types, and Applications, International Journal of Energy Research, 2024, 7271748, 36 pages, 2024. https://doi.org/10.1155/2024/7271748

QIU, Z., MAN, Q., MU, Y., GU, H., ZOU, Z., HAN, M. AND ZENG, L. (2025), Modification Strategies for Enhancing the Performance of Lithium Manganese Iron Phosphate Cathodes in Lithium-Ion Batteries. Chem. Methods, 5: e202400065. https://doi.org/10.1002/cmtd.202400065

RAJENDRAN, S.; DIAZ, M.; CÁRDENAS, R.; ESPINA, E.; CONTRERAS, E.; RODRIGUEZ, J. A Review of Generators and Power Converters for Multi-MW Wind Energy Conversion Systems. Processes 2022, 10, 2302. https://doi.org/10.3390/pr10112302

RAND, D. A. J.; MOSELEY, P. T. Energy Storage with Lead–Acid Batteries. In Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing; Elsevier, 2015; pp 201–222. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62616-5.00013-9.

REDLINGER, M.; EGGERT R., Volatility of by-product metal and mineral prices, Resources Policy, Volume 47, 2016, Pages 69-77, ISSN 0301-4207, https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.12.002.

RENDU, J.-M.; MISKELLY, N. Mineral Resources and Mineral Reserves: Progress on International Definitions and Reporting Standards. Mining Technology 2001, 110 (3), 133–138. https://doi.org/10.1179/mnt.2001.110.3.133.

RICARDO, D. (1821). On the principles of political economy, and taxation (3rd ed.). London: John Murray.

RIDLEY J (2013). What is an ore deposit? In: *Ore Deposit Geology*. Cambridge University Press; 2013:1-21.

RIAHI, K.; VAN VUUREN, D. P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CUARESMA, J. C.; KC, S.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENÖDER, F.; DA SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M. The Shared Socioeconomic Pathways and Their Energy, Land Use, and Greenhouse Gas Emissions Implications: An Overview. Global Environmental Change 2017, 42, 153–168. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

ROBERTS, H. State mining enterprises into the 1990s - the corporate strategic response Minerals & Energy - Raw Materials Report, 1988 - https://doi.org/10.1080/14041048809409904

ROCHEDO, P.R.R., Soares-Filho, B., Schaeffer, R. et al. The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil. Nature Clim Change **8**, 695–698 (2018). https://doi.org/10.1038/s41558-018-0213-y

RODRIGUES, M. Bolsonaro's Troubled Legacy for Science, Health and the Environment. Nature 2022, 609 (7929), 890–891. https://doi.org/10.1038/d41586-022-03038-3.

ROUSH, G. A. “Strategic Mineral Supplies 1. General Survey.” The Military Engineer, vol. 26, no. 147, 1934, pp. 186–90. JSTOR, http://www.jstor.org/stable/44576056

ROUSH, G. A. “Strategic Mineral Supplies 15. Strategic and Critical Minerals.” The Military Engineer, vol. 30, no. 173, 1938, pp. 370–74. JSTOR, http://www.jstor.org/stable/44559078.

ROUSH, G. A. “Strategic Mineral Supplies in Foreign Countries.” The Military Engineer, vol. 31, no. 178, 1939, pp. 288–92. JSTOR, http://www.jstor.org/stable/44566806.

SARAIVA, T. A. “Uma Aplicação de um Modelo Multi-Hubbert Modificado para a Elaboração de Cenários de Produção de Petróleo no Brasil.” Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético - Programa de Planejamento Energético - COPPE – UFRJ, 2013, disponível em https://ppe.coppe.ufrj.br/publicacao/uma-aplicacao-de-um-modelo-multi-hubbert-modificado-para-a-elaboracao-de-cenarios-de-producao-de-petroleo-no-brasil/

SCHICHO, M., TERCERO ESPINOZA, L. Criticality assessment for raw materials: perspectives and focuses. *Miner Econ* (2024). https://doi.org/10.1007/s13563-024-00474-7

SCHLABACH, T. D. Substitution: Technology. Conservation & Recycling 1984, 7 (1), 15–20. https://doi.org/10.1016/0361-3658(84)90083-3.

SCHULZ, K.J., DEYOUNG, J.H., JR., BRADLEY, D.C., AND SEAL, R.R., II, 2017, Critical mineral resources of the United States—An introduction, chap. A of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. A1– A14, http://dx.doi.org/10.3133/pp1802A

SHI, H., HENG, J., DUAN, H., LI H., CHEN, W., WANG, P., CUI, L., WANG, S. Critical mineral constraints pressure energy transition and trade toward the Paris Agreement climate goals. *Nat Commun* **16**, 4496 (2025). https://doi.org/10.1038/s41467-025-59741-y

SHOJAEDDINI, E., ALONSO, E., NASSAR, N.T. et al. Understanding market sensitivity: estimation of supply and demand elasticities for non-fuel minerals. Miner Econ 38, 985–996 (2025). https://doi.org/10.1007/s13563-025-00537-3

SHOURANGIZ-HAGHIGHI A. et al. Developing More Efficient Wind Turbines: A Survey Of Control Challenges And Opportunities. Ieee Industrial Electronics Magazine, V. 14, N. 4, P. 53-64, Dez. 2020. Doi: 10.1109/Mie.2020.2990353.

SKINNER, B.J. "Chapter 10 - A Second Iron Age Ahead?" Editor(s): P.A. Trudinger, D.J. Swaine, Studies in Environmental Science, Elsevier, Volume 3, 1979, Pages 559-575, ISSN 0166-1116, ISBN 9780444417459, https://doi.org/10.1016/S0166-1116(08)71071-9.

SMETS, A; JAGER, K; OLINDO, I; SWAAIJ, R.; ZEMAN, M. "Solar Energy – The physics and engineering of Photovoltaic conversion technologies and systems" - 2015 – UIT Cambridge

SMITH, G. O. (1917). The Economic Limits to Domestic Independence in Minerals. In H. D. McCaskey (Ed.),Mineral resources of the United States 1917 (pp. 1–6). Department of the Interior. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/08120099.2024.2430279?needAccess=true

SMITH, BRITTANY L., MICHAEL WOODHOUSE, KELSEY A. W. HOROWITZ, TIMOTHY J. SILVERMAN, JARETT ZUBOY, AND ROBERT M. MARGOLIS. 2021. Photovoltaic (PV) Module Technologies: 2020 Benchmark Costs and Technology Evolution Framework Results. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-7A40-78173. Disponível em: https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/78173.pdf

SMITH, B. J.; EGGERT, R. G. Multifaceted Material Substitution: The Case of NdFeB Magnets, 2010–2015. JOM 2016, 68 (7), 1964–1971. https://doi.org/10.1007/s11837-016-1913-2.

SMITH, B. J.; EGGERT, R. G. Costs, Substitution, and Material Use: The Case of Rare Earth Magnets. Environmental Science & Technology 2018, 52 (6), 3803–3811. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05495.

SRIVASTAVA N., KUMAR A., Minerals and energy interface in energy transition pathways: A systematic and comprehensive review, Journal of Cleaner Production, Volume 376, 2022, 134354, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134354.

STEPHAN A., HETTESHEIMER T., NEEF C., SCHMALTZ T., LINK S., STEPHAN M., HEIZMANN J.L., THIELMANN A., Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI. September, 2023

TAKANASHI, M. 2025 – Transportation and the coming electrification of Everything. IdTechEx. Disponível em: https://www.idtechex.com/en/webinar/transportation-and-the-coming-electrification-of-everything/655#:~:text=Although%20the%20electrification%20of%20vehicles,and%20unlock%20cheaper%20energy%20costs

TESELETSO, L.S., ADACHI, T. Future availability of mineral resources: ultimate reserves and total material requirement. *Miner Econ* **36**, 189–206 (2023). https://doi.org/10.1007/s13563-021-00283-2

THAKAR, D., PATEL R.A. "Comparison of Advance and Conventional Motors for Electric Vehicle Application", 2019 3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering. https://doi.org/10.1109/RDCAPE47089.2019.8979092

TILTON, J.E.(2001) - Mining, Minerals and Sustainable Development March 2001 No. 14 Depletion and the Long-run Availability of Mineral Commodities. Disponível em: https://www.iied.org/g01035

TILTON, J. E. Substitution: Economics. Conservation & Recycling 1984, 7 (1), 21–26. https://doi.org/10.1016/0361-3658(84)90084-5.

TILTON J. E., The Hubbert peak model and assessing the threat of mineral depletion, Resources, Conservation and Recycling, Volume 139, 2018, Pages 280-286, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.026.

TOMAZIC, G.; SKYLLAS-KAZACOS, M. Redox Flow Batteries. In Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing; Elsevier, 2015; pp 309–336. https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62616-5.00017-6.

TOYOTA, 2025 – Toyota Prius – Battery Indormation. Disponível em: https://www.toyotacarson.com/toyota-prius-battery-information/

UMWELTBUNDESAMT (2025). Integrated Assessment of the UN Sustainable Development Goals (SDGs) in Transformation Pathways towards a Resource-Efficient and Greenhouse-Gas-Neutral Germany. UBA Texte 28/2025. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Retrieved from https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/integrated-assessment-of-the-un-sustainable.

UNEP. Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their 227 Recycling Potential., 2009. Disponível em: https://www.oeko.de/en/publications/critical-metals-for-sustainable-technologies-and-their-recycling-potential/

UNFCC (2013) – Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Lima from 11 to 23 November 20143 Addendum – Part two: Action Taken by the Conference of the Parties at its nineteenth session. Disponível em: https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/past-conferences/warsaw-climate-change-conference-november-2013/cop-19/cop-19-reports

UNFCC (2014) – Report of the Conference of the Parties on its twentieth session, held in Lima from 1 to 14 December 2014 Addendum – Part two: Action Taken by the Conference of the Parties at its twentieth session. Disponível em: https://unfccc.int/conference/lima-climate-change-conference-december-2014

UNFCC (2023) – Outcome of the first global stocktake – Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/1_CMA.5.pdf

UNITED NATIONS. (2015). *Paris Agreement*. https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement

UNITED NATIONS. (2020). “United Nations Framework Classification for Resources: Update 2019”. ECE ENERGY SERIES No. 61. New York: United Nations [1, 3, 7].

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2025). Emissions Gap Report 2025: Off target – Continued collective inaction puts global temperature goal at risk [Olhoff, A., chief editor; Lamb, W.; Kuramochi, T.; Rogelj, J.; den Elzen, M.;

Christensen, J.; Fransen, T.; Pathak, M.; Tong, D. (eds)]. Nairobi. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/4885

VALERO, A., VALERO, A., CALVO, G. (2021). On the Availability of Resources on Earth. In: The Material Limits of Energy Transition: Thanatia. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-78533-8_3

VAN BEEK, L.; OOMEN, J.; HAJER, M.; PELZER, P.; VAN VUUREN, D., Navigating the political: An analysis of political calibration of integrated assessment modelling in light of the 1.5 °C goal, Environmental Science & Policy, Volume 133, 2022, Pages 193-202, ISSN 1462-9011, https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.024.

VAN BEEK, L.; HAJER, M.; PELZER, P.; VAN VUUREN, D.; CASSEN, C. Anticipating Futures through Models: The Rise of Integrated Assessment Modelling in the Climate Science-Policy Interface since 1970. Global Environmental Change 2020, 65, 102191. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102191.

VAN DE VEN, DJ., MITTAL, S., GAMBHIR, A. et al. A multimodel analysis of post-Glasgow climate targets and feasibility challenges. Nat. Clim. Chang. **13**, 570–578 (2023). https://doi.org/10.1038/s41558-023-01661-0

VAN NOORDEN, R. The rechargeable revolution: A better battery. *Nature* **507**, 26–28 (2014). https://doi.org/10.1038/507026a

VAN SOEST, H. L.; VAN VUUREN, D. P.; HILAIRE, J.; MINX, J. C.; HARMSEN, M. J. H. M.; KREY, V.; POPP, A.; RIAHI, K.; LUDERER, G. Analysing Interactions among Sustainable Development Goals with Integrated Assessment Models. Global Transitions 2019, 1, 210–225. https://doi.org/10.1016/j.glt.2019.10.004.

VAN VUUREN, D. P.; ZIMM, C.; BUSCH, S.; KRIEGLER, E.; LEININGER, J.; MESSNER, D.; NAKICENOVIC, N.; ROCKSTROM, J.; RIAHI, K.; SPERLING, F.; BOSETTI, V.; CORNELL, S.; GAFFNEY, O.; LUCAS, P. L.; POPP, A.; RUHE, C.; VON SCHILLER, A.; SCHMIDT, J. O.; SOERGEL, B. Defining a Sustainable Development Target Space for 2030 and 2050. One Earth 2022, 5 (2), 142–156. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.003.

VARON, B. (1971). Review of the world nickel situation (Staff Working Paper No. 108). World Bank Group.

VDMA. (2025). International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV), 16th Edition. VDMA. Disponível em: https://www.vdma.eu/en/viewer/-/v2article/render/143159365

VERHOEF, E. V.; DIJKEMA, G. P. J.; REUTER, M. A. Process Knowledge, System Dynamics, and Metal Ecology. Journal of Industrial Ecology 2004, 8 (1–2), 23–43. https://doi.org/10.1162/1088198041269382.

WAGNER, R., Chapter 9 - Stationary applications. III. Lead-acid batteries for solar and wind energy storage, Editor(s): M. Broussely, G. Pistoia, Industrial Applications of Batteries, Elsevier, 2007, Pages 497-545, ISBN 9780444521606, https://doi.org/10.1016/B978-044452160-6/50010-3.

WANG, M., LI, L., WANG, M. et al. Recent progress in palladium-nonmetal nanostructure development for fuel cell applications. NPG Asia Mater **14**, 78 (2022). https://doi.org/10.1038/s41427-022-00423-2

WEATHERSTONE, 2008 - International Standards for Reporting of Mineral Resources and Reserves - Status, Outlook and Important Issues. Disponível em: https://crirsco.com/wp-content/uploads/2024/04/isr_mineral_resources_reserves0908.pdf

WELLMER, F.-W. Reserves and Resources of the Geosphere, Terms so Often Misunderstood. Is the Life Index of Reserves of Natural Resources a Guide to the Future? Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 2008, 159 (4), 575–590. https://doi.org/10.1127/1860-1804/2008/0159-0575.

WELLMER, F.-W., SCHOLZ, R.W., 2017. Peak gold? Not yet! A response to Calvo et al. (2017). Resour. Conserv. Recycl. http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.11.015.

WELLMER, FW., SCHOLZ, R.W. & BASTIAN, D. Correction: Can ultimate recoverable resources (URRs) be assessed? Does analyzing declining ore grades help?. *Miner Econ* **37**, 725 (2024). https://doi.org/10.1007/s13563-024-00431-4

WEYANT, J. Some Contributions of Integrated Assessment Models of Global Climate Change. Review of Environmental Economics and Policy 2017, 11 (1), 115–137. https://doi.org/10.1093/reep/rew018.

WHITTINGHAM, M. S., "History, Evolution, and Future Status of Energy Storage," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1518-1534, 13 May 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2190170.

WMO 2025 - https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level

WMO, 2025 – State of the Global Climate 2024 - https://library.wmo.int/idurl/4/69455

XIE, J.; LU, Y.-C. A Retrospective on Lithium-Ion Batteries. Nature Communications 2020, 11 (1). https://doi.org/10.1038/s41467-020-16259-9.

XIN S, ZHANG X, WANG L, YU H, CHANG X, ZHAO YM, MENG Q, XU P, ZHAO CZ, CHEN J, LU H, KONG X, WANG J, CHEN K, HUANG G, ZHANG X, SU Y, XIAO Y, CHOU SL, ZHANG S, GUO Z, DU A, CUI G, YANG G, ZHAO Q, DONG L, ZHOU D, KANG F, HONG H, ZHI C, YUAN Z, LI X, MO Y, ZHU Y, YU D, LEI X, ZHAO J, WANG J, SU D, GUO YG, ZHANG Q, CHEN J, WAN LJ. Roadmap for rechargeable batteries: present and beyond. Sci China Chem, 2024, 67: 13– 42, https://doi.org/10.1007/s11426-023-1908-9

YAN W., WANG Z., CAO H., ZHANG Y., SUN Z., Criticality assessment of metal resources in China, iScience, Volume 24, Issue 6, 2021, 102524, ISSN 2589-0042, https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102524.

YANG Z., SHANG F., BROWN I. P., KRISHNAMURTHY M., "Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 1, no. 3, pp. 245-254, Oct. 2015, doi: 10.1109/TTE.2015.2470092.

YARAMASU V., WU B., SEN P. C., KOURO S., NARIMANI M., "High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies," in Proceedings of the IEEE, vol. 103, no. 5, pp. 740-788, May 2015, doi: 10.1109/JPROC.2014.2378692

YIN, J., LIN, H., SHI, J. *et al.* Lead-Carbon Batteries toward Future Energy Storage: From Mechanism and Materials to Applications. *Electrochem. Energy Rev.* **5**, 2 (2022). https://doi.org/10.1007/s41918-022-00134-w

ZAJEC, O. (2010) – Controle da matéria-prima e tecnologias em disputa. Le Monde diplomatique – Brasil, novembro 2010, p. 22- 23. Disponível em: https://diplomatique.org.br/controle-da-materia-prima-e-tecnologias-em-disputa/

ZHANG, C., ZHAO, X., SACCHI, R. YOU, F. Trade-off between critical metal requirement and transportation decarbonization in automotive electrification. *Nat Commun* **14**, 1616 (2023). https://doi.org/10.1038/s41467-023-37373-4

ZOTIN, Z. M. "O Papel da China na Transição Energética Global: Estado, Indústria e Recursos" Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético - Programa de Planejamento Energético - COPPE – UFRJ, 2018, disponível em https://ppe.coppe.ufrj.br/publicacao/o-papel-da-china-na-transicao-energetica-global-estado-industria-e-recursos/

Anexo 1 – Modelos de Avaliação Integrada (IAMs)

Modelos de Avaliação Integrada (Integrated Assessment Models – IAMs) são representações matemáticas simplificadas de sistemas complexos que integram dimensões econômicas, sociais, energéticas, ambientais e, em alguns casos, climáticas (FÜSSEL, 2010; CLARKE et al., 2014; WEYANT, 2017; FISHER-VANDEN E WEYANT, 2020). O uso principal desses tem sido para a análise, de forma consistente e quantitativa, as interações entre atividades humanas e o sistema terrestre ao longo de horizontes temporais de médio e longo prazo, fornecendo subsídios para a formulação de políticas públicas relacionadas às mudanças climáticas e ao desenvolvimento sustentável (BAPTISTA, 2020; IPCC, 2022; HOLLNAICHER, 2025; UMWELTBUNDESAMT, 2025; DIETZ et al., 2026).

A relevância dos IAMs decorre de sua capacidade de capturar compromissos ("trade-offs") e sinergias entre diferentes objetivos, como crescimento econômico, segurança energética, uso da terra e mitigação de emissões de GEE em um arcabouço analítico único e de e temporalmente amplo. Esses modelos permitem explorar trajetórias alternativas de desenvolvimento sob diferentes pressupostos socioeconômicos, tecnológicos e institucionais, evitando análises fragmentadas e inconsistentes entre setores (VAN BEEK et al., 2022). MENDELSOHN (2020) argumenta que a consistência interna talvez seja sua principal vantagem, apesar de a complexidade e sofisticação crescente dos modelos torne essa consistência cada vez menos transparente e de difícil compreensão.

Por esses motivos apresentados, os IAMs tornaram-se ferramentas centrais nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), sendo amplamente utilizados para a construção de cenários globais e regionais de mitigação, adaptação e transição para economias de baixo carbono (VAN BEEK et al., 2020; MCLAREN E MARKUSSON, 2022). Sua relevância é atestada em entrevista de um membro do secretariado do IPCC (VAN BEEK et al., 2022):

"Se não tivéssemos IAMs, teríamos que inventá-los, porque eles são a única forma de conectar a atividade humana às mudanças climáticas em uma escala de século"[57].

Tipologias de IAMs

Os modelos de análise integrada são heterogêneos, variando em nível de detalhamento, complexidade, interconexões e contextos[58] (WEYANT, 2017; BAPTISTA, 2020; FISHER-VANDEN E WEYANT, 2020). A discussão a seguir trata somente de IAMs focados em mudanças climáticas. Dentre os diversos tipos de IAMs, dois podem ser destacados como principais – IAMs de custo-benefício (CB-IAMs) e IAMs baseados em processos (PB-IAMs).

O primeiro tipo (CB-IAMs) é constituído por representações altamente agregadas dos sistemas envolvidos (geralmente econômico e climático) que buscam um nível ótimo de mitigação climática a partir de um balanço entre, de um lado, os impactos econômicos e sociais das mudanças climáticas e, de outro, os custos associados às políticas e tecnologias necessárias para evitá-las (WEYANT, 2017; HOLLNAICHER, 2025). O segundo tipo compreende modelos significativamente mais complexos, devido ao seu maior detalhamento de processos envolvidos nos sistemas, sendo, portanto, intrinsecamente desagregado. Essa desagregação pode se dar a nível setorial e regional, além de apresentar diversas opções de mitigação (tecnologias). Seu foco principal está justamente nas trajetórias de mitigação de emissões de GEE, para se alcançar um objetivo[59] climático. Assim, impactos climáticos e danos econômicos não são normalmente fornecidos como saída diretas dos modelos baseados em processos (FISHER-VANDEN E WEAYANT, 2020; HOLLNAICHER, 2025).

Esses tipos de IAMs correspondem a duas tipologias distintas de modelos de análise integrada – modelos top-down (CB-IAMs) e modelos bottom-up (PB-IAMs).

---

[57] Traduzido livremente. Citação original: “if we did not have IAMs, we’d have to invent them because they are the only way to getting between human activity on climatic changes on a century scale”. (VAN BEEK et al., 2022).

[58] Como apontado por FISHER-VANDEN E WEYANT (2020), modelos de análise integrados podem considerar diferentes contextos, como chuva ácida e qualidade do ar. BAPTISTA (2020) ressalta que eles ainda podem ser divididos como modelos de circulação, uso do solo, econômicos ou energéticos.

[59] Atualmente, estes objetivos são tipicamente expressos em termos de temperaturas (HOLLNAICHER, 2025), representando a fase contemporânea das políticas climáticas e o zeitgeist das negociações climáticas e do debate público desde o acordo de Paris (MCLAREN E MARKUSSON, 2020). Como discutido anteriormente, em vez de adotar a temperatura como restrição de uma função-objetivo, os modelos IAMs também podem construir cenários a fim de avaliar as políticas climáticas vigentes ou prometidas (NDCs) em nível nacional ou agregado globalmente. Assim, as temperaturas são dadas como resultado do modelo e não como um parâmetro exógeno de entrada (no caso de análises nacionais, o resultado é dado em contribuição para a mudança de temperatura).

Modelos top-down, como discutido anteriormente, enfatizam representações agregadas dos sistemas, em detrimento de análises detalhadas e da heterogeneidade de tecnologias. Já modelos bottom-up focam no detalhamento tecnológico dos sistemas energéticos e produtivos, permitindo analisar explicitamente a difusão de tecnologias, ganhos de eficiência e substituições entre vetores energéticos. Os modelos mais modernos, no entanto, adotam ambas as metodologias, adotando uma abordagem híbrida (IPCC, 2022).

Os IAMs podem ser distinguidos, também, entre modelos de simulação ou de otimização. Modelos de simulação avaliam o desempenho de um sistema sob determinadas premissas exógenas, enquanto modelos de otimização buscam minimizar ou maximizar uma função-objetivo – geralmente o custo total do sistema ou o bem-estar social – sujeita a restrições técnicas, econômicas ambientais e climáticas. Em estudos climáticos, é comum o uso de orçamentos de carbono como restrições centrais[60] (BAPTISTA, 2018).

Os modelos de otimização podem utilizar diferentes estratégias de otimização: otimização intertemporal com visão perfeita ("perfect forsight") e otimização recursiva dinâmica (também chamada de otimização míope). Na otimização intertemporal com visão perfeita, todo horizonte de planejamento é considerado simultaneamente, chegando a uma solução ótima geral. Essa metodologia reduz a probabilidade de custos de arrependimento oriundos de lock-in tecnológicos e de custos afundados. Normalmente esse tipo de visão está mais associado a políticas de estado com longos prazos de duração. Otimização recursiva dinâmica, por sua vez, é uma metodologia em que a solução ótima é apresentada a cada intervalo de tempo, sem considerar o ótimo no longo prazo. Por esse motivo, a solução geral encontrada dificilmente é a solução ótima do sistema. Ao invés disso, a solução geral é um conjunto de soluções ótimas de curto-prazo sequenciais. Esse tipo de metodologia se assemelha ao desafio que formuladores de políticas públicas encontram em democracias (BAPTISTA, 2020; IPCC, 2022).

[60] Muitas vezes, IAMs não possuem o refinamento técnico necessário para calcular as temperaturas resultantes dos cenários criados. Essa etapa é normalmente realizada por modelos de circulação - modelos climáticos específicos que representam a terra, os ecossistemas, a atmosfera, os oceanos e o gelo e usados para avaliar alterações no albedo solar, na constante solar, no regime de ventos, etc (BAPTISTA, 2020). Os IAMs baseados em processos podem ser acoplados a estes modelos de circulação ou utilizar emuladores climáticos para associar a concentração de GEE e temperatura.

Por fim, IAMs ainda podem diferir em relação a suas escalas temporais e a suas coberturas geográficas. Assim, IAMs podem variar o horizonte temporal analisado, além de apresentar dimensões globais, voltados à análise de trajetórias mundiais de emissões e políticas climáticas, ou regionais, nacionais e subnacionais, que focam em recortes menores e específicos do mundo. Para os cenários utilizados pelo IPCC, por exemplo, é comum a adoção de cenários globais que cubram períodos até 2100, a fim de avaliar o cumprimento do Acordo de Paris. Já para planejamentos nacionais, podem-se adotar horizontes temporais mais curtos e, idealmente recortes geográficos mais específicos, a fim de se ter maior detalhamento da realidade nacional incorporada ao modelo. Esses últimos são particularmente relevantes para países em desenvolvimento, cujas especificidades muitas vezes não são plenamente capturadas por modelos globais.

Há diversas outras formas de caracterização e distinção entre os IAMs, como variáveis ambientais, portfolios tecnológicos, premissas socioeconômicas, entre outros (IPCC, 2023). Assim, seria quase impossível discuti-las de forma exaustiva. No entanto, para o âmbito deste trabalho e seu escopo, as principais características e tipologias de IAMs foram apresentadas nesta seção. Não obstante, os modelos de análise integradas estão em constante evolução e, em algum momento, a discussão feita aqui poderá estar ultrapassada. Como apontam Fisher-Vanden e Weyant (2020), a próxima geração de IAMs deverá considerar mais a fundo impactos, adaptação e vulnerabilidades a mudança climática em seus modelos, tornando-os ainda mais complexos e detalhados.

O modelo BLUES

O Brazilian Land-Use and Energy Systems Model (Modelo BLUES) é um IAM nacional desenvolvido ao longo das últimas duas décadas no Laboratório Cenergia, da COPPE/UFRJ (CEBRI, 2023). O modelo foi construído na plataforma MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impacts), um software de otimização em programação linear para sistemas energéticos originalmente desenvolvida pelo International Institute for Applied System Analysis (IIASA) (ROCHEDO et al., 2018; BAPTISTA, 2020).

Do ponto de vista tipológico, o BLUES é um modelo “bottom-up”, de otimização intertemporal com visão perfeita, orientado à minimização do custo total do sistema (ROCHEDO et al., 2018). Ele representa de forma detalhada os setores de energia, uso da terra, agricultura, indústria e recursos hídricos no Brasil, permitindo a análise integrada

dos nexos energia–água–alimentos. O modelo é regionalizado em seis regiões – uma nacional e cinco sub-regiões alinhadas à divisão geopolítica brasileira – e opera no horizonte de 2010 a 2050, em intervalos de cinco anos (ROCHEDO et al., 2018; CEBRI, 2023; IAMCWIKI, 2025).

O sistema energético é descrito com elevado grau de detalhamento tecnológico, incluindo mais de 1.500 tecnologias de extração, transformação, transporte e uso final de energia. De maneira simplificada, o modelo representa a competição entre diferentes tecnologias e fontes de energia no atendimento à demanda por serviços energéticos. Essas demandas são exógenas ao modelo e abrangem, entre outros, iluminação, necessidades de aquecimento e resfriamento, energia mecânica e mobilidade, tendo como objetivo central a minimização do custo total do sistema energético (ROCHEDO et al., 2018). Esse objetivo deve ser atingido mediante restrições exógenas, tais quais um orçamento de carbono ou valores absolutos de emissões específicas. Em última análise, o BLUES avalia, em nível nacional, as trajetórias tecnológicas e setoriais mais custo-efetivas para atender às demandas projetadas dentro desses limites.

No contexto da segunda NDC brasileira, o modelo BLUES desempenha um papel central ao possibilitar a identificação e a caracterização das principais transformações tecnológicas e estruturais necessárias para o cumprimento das metas de mitigação assumidas pelo país. Para desenvolver as novas contribuições nacionais, foram utilizadas como base trajetórias de descarbonização para setores como eletricidade, transportes, petróleo e gás, biocombustíveis e agropecuária (BRASIL, 2024).

Anexo 2 – Criticidade Elementar

Tabela 13 – Atribuição da criticidade dos elementos avaliados.

Elemento	Elemento	Produção	HHI	Nota	Companheirismo Mineral	Nota	Produção (kt)	Nota	Nota Final
Cu	Cobre	Mineração	1097	2	9%	1	21.415,00	1	2
Ni	Niquel	Mineração	2110	3	2%	1	2.812,00	2	6
Pb	Chumbo	Mineração	2203	3	10%	2	4.559,00	2	12
Mn	Manganês	Mineração	1862	2	3%	1	21.219,00	1	2
Pt	Platina	Mineração	5519	5	16%	2	0,19	5	50
Nd	Neodímio	Mineração	4923	4	100%	5	47,44	4	80
Dy	Disprósio	Mineração	4923	4	100%	5	3,13	5	100
Gd	Gadolínio	Mineração	4923	4	82%	5	5,09	5	100
Sm	Samario	Mineração	4923	4	81%	5	5,45	5	100
Tb	Térbio	Mineração	4923	4	100%	5	0,71	5	100
Pr	Praseodímio	Mineração	4923	4	100%	5	15,07	4	80
Ga	Gálio	Refinaria	9039	5	100%	5	0,44	5	125
Se	Selênio	Refinaria	2004	3	100%	5	3,71	5	75
Te	Telurio	Refinaria	3110	3	100%	5	0,68	5	75
Ag	Prata	Mineração	1087	2	70%	4	25.200,00	1	8
Co	Cobalto	Mineração	4876	4	85%	5	134,00	3	60
Li	Lítio	Mineração	3380	3	52%	4	575,00	3	36
B	Boro	Mineração	3164	3	0%	1	5.346,00	2	6
Cd	Cádmio	Refinaria	2100	3	100%	5	25,00	4	60
V	Vanádio	Mineração	4488	4	82%	5	115,00	3	60
Sr	Estrôncio	Mineração	3703	4	0%	1	583,00	3	12
Sn	Estanho	Mineração	1690	2	3%	1	271,00	3	6
Nb	Nióbio	Mineração	8595	5	2%	1	121,00	3	15
Gr	Grafita Natural	Mineração	4451	4	NA	1	1.252,00	2	8
Si	Silício	Refinaria	5454	5	NA	1	3.284,00	2	10
In	Índio	Refinaria	3997	4	100%	5	1,01	5	100
Ge	Germânio	Refinaria	5745	5	100%	5	0,18	5	125

Anexo 3 – Intensidade material

Tabela 14 - Intensidade material para baterias (kg/kWh).

	Lítio	Níquel	Cobalto	Manganês	Cobre	Grafita	Chumbo
LFP	0,10	-	-	-	0,45	1,00	-
LMFP	0,08	-	-	0,30	0,48	0,96	-
NCA	0,10	0,70	0,13	-	0,30	0,90	-
NMC - 622	0,12	0,52	0,17	0,18	0,31	0,90	-
NMC - 811	0,10	0,65	0,08	0,08	0,27	0,90	-
NMC-955	0,09	0,82	0,04	0,04	-	0,90	-
Na-íon	-	0,50	-	0,60	-	-	-
Chumbo- ácido	-	-	-	-	-	-	18,40

Fonte**:** Elaboração própria com base em BARLOCK et al., 2024; LI et al., 2024; IEA, 2024; IRENA, 2024; MAISEL et al., 2024; WALTER et al., 2024; HOSSAIN et al. 2020; NADEEM et al. 2019; SPANOS et al., 2015.

Tabela 15 - Intensidade material de Pilhas à Combustível de Membrana Protônica

Materiais (kg/kW)		
Platina	Carbon black	PFSA total
6,01E-04	7,19E-04	1,76E-02

Elaboração própria com base em SIMONS E BAUER, 2015; NOTTER et al., 2015; EVANGELISTI et al., 2017; MIOTTI et al., 2017; Usai et al. 2021; RIEMER et al., 2023; MORI et al. 2023; KRISHNAN et al., 2024; SPREAFICO e THONEMANN 2025; PALADIN et al., 2025; STROPNIK et al., 2019.

Tabela 16 - Intensidade material de ímãs Permanentes (NdFeB).

Material	**Intensidade Material (kg/kg)**
Alumínio	0,36%
Boro	0,98%
Cobalto	2,17%
Cobre	0,03%
Disprósio	4,87%
Gadolínio	0,26%
Ferro	65,08%
Nióbio	0,15%
Neodímio	23,6%
Níquel	0,15%
Praseodímio	2,27%
Samário	0,13%

Fonte**:** Elaboração própria com base em GERGORIC et al. (2017); KUMARI et al. (2018) e JIN et al. (2016).

Tabela 17 - Intensidade material das células solares (Silício Monocristalino; Telureto de Cádmio e Disseleneto de Cobre-Indio-Gálio)

Material	Família Tecnológica	Valor Médio (Tonelada/GW)
Alumínio	Mono-Si	35,00
Cadmio	CdTe	28,00
Cobre	CIGS	22,00
Gálio	CIGS	5,00
Índio	CIGS	19,00
Selênio	CIGS	41,00
Silício	Mono-Si	1.915,00
Prata	Mono-Si	13,00
Telúrio	CdTe	34,00

Fonte**:** Elaboração própria com base em VDMA, 2022; VDMA, 2025; FIRSTSOLAR, 2024; CARRARA et al. 2020; MCNULTY E JOWITT, 2022.

Tabela 18 - Intensidade material dos geradores em turbinas eólicas Onshore.

Material	Família Tecnológica	Unidade	Valor Médio
Cobre	DFIG	Tonelada/MW	0,46
Cobre	PMSG	Tonelada/MW	1,25
Imã Permanente	PMSG – DD	Kg/MW	650,00
Imã Permanente	PMSG – 1G	Kg/MW	160,00
Imã Permanente	PMSG – 3G	Kg/MW	80,00

Fonte: Elaboração própria com base em FARINA E ANCTIL, 2022; LACAL-ARÁNTEGUI, 2015.

Tabela 19- Intensidade material em motores elétricos. Nota: A unidade do Imã permanente é em quilograma de ímã por quilograma de Motor.

Material	Technology Family	Unidade	Valor médio
Cobre	PMSM	kg/kW	0,061
Cobre	IM	kg/kW	0,160
Cobre	SRM	kg/kW	0,165
Imã Permanente	PMSM	kg/kg	0,028

Fonte: Elaboração própria com base em NORDELOF et al., 2019 e COLLINS, 2020.

Referências:

BARLOCK, T. A. et al. Securing Critical Materials for the U.S Electric Vehicle Industry – A landscape assessment of domestic and international supply chaind for five key Battery materials. Argonne National Laboratory, Chicago, 2024. 106p.

EVANGELISTI, S. et al. Life Cycle Assessment of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System for Passenger Vehicles. Journal of Cleaner Production, v. 142, p.4339–55, 2017. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.159.

FARINA A.; ANCTIL, A., "Material consumption and environmental impact of wind turbines in the USA and globally", Resources, Conservation and Recycling, Volume 176, 2022, 105938, ISSN 0921-3449, https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105938.

FIRST SOLAR, 2024. Series 7 FT1 - 505-550 Watt Thin Film Solar Module. Disponível em: https://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Technical-Documents/Series-7/Series-7-FT1-Datasheet.pdf

GERGORIC, M.; CHRISTIAN EKBERG, C.; FOREMAN, M. R. ST J.; STEENARI, B.; RETEGAN, T. "Characterization and Leaching of Neodymium Magnet Waste and Solvent Extraction of the Rare-Earth Elements Using TODGA", Journal of Sustainable Metallurgy, 2017 Volume 3, pages 638–645, (2017) https://doi.org/10.1007/s40831-017-0122-8

HOSSAIN, E. et al. A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects. Energies, v. 13, n. 3651, 2020.

INTERNATIONAL ENEGERGY AGENCY (IEA). Batteries and Secure Energy Transitions. Paris, 2024. Disponível em:

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Critical materials: Batteries for electric vehicles, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2024. 76p.

KRISHNAN, SUBRAMANI, BLANCA CORONA, GERT JAN KRAMER, MARTIN JUNGINGER, AND VINZENZ KONING. 2024. "Prospective LCA of Alkaline and PEM Electrolyser Systems." International Journal of Hydrogen Energy 55 (November 2023): 26–41. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.192.

KUMARI, A.; SINHA, M. K.; PRAMANIK, S; SAHU, S. K., 2018. “Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects”, Waste Management, Volume 75, 2018, Pages 486-498, ISSN 0956-053X, https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.033.

LACAL-ARÁNTEGUI, R., 2015. “Materials use in electricity generators in wind turbines – state-of-the-art and future specifications”, Journal of Cleaner Production, Volume 87, 2015, Pages 275-283, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.047.

LI, E.; BIEKER, G.; SEN, A. Electrifying Road transport with less mining: A global and regional battery material outlook. International Council on Clean Transportation (ICCT). Washington DC, 2024.

MAISEL, F. et al. A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles. Resources, Conservation & Recycling, v. 192, 106920, 2023. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106920.

MCNULTY B.A.; JOWITT, S. M., 2022. “Byproduct critical metal supply and demand and implications for the energy transition: A case study of tellurium supply and CdTe PV demand”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 168, 2022, 112838, ISSN 1364-0321, https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112838.

MIOTTI, M.; HOFER, J. E; BAUER, C. Integrated Environmental and Economic Assessment of Current and Future Fuel Cell Vehicles. International Journal of Life Cycle Assessment, v. 22, n. 1, p. 94–110, 2017. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0986-4.

MORI, M. et al. Life Cycle Sustainability Assessment of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Technology for Ecodesign Purposes. International Journal of Hydrogen Energy, v. 48, n. 99, p. 39673–89, 2023. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.255.

NADEEM et al. Comparative Review of Energy Storage Systems, Their Roles, and Impacts on Future Power Systems. IEEE Acess, v. 7, 2019.

NORDELÖF, A. et al., 2019. Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors, Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 67, pgs. 263-274, ISSN 1361-9209, https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004.

NOTTER, D. A. Life Cycle Assessment of PEM FC Applications: Electric Mobility and μ-CHP. Energy and Environmental Science, v. 8, n. 7, p. 1969–85, 2015. https://doi.org/10.1039/c5ee01082a.

PALADIN, G. et al. A Comparative Life Cycle Assessment of Pt Nanoalloy/Carbon Nitride/Graphene Electrocatalysts for PEMFC Stacks. Chemical Engineering Journal, v. 505, 2025. https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.159251.

RIEMER, M.; DUVAL-DACHARY, S.; BACHMANN, T. M. Environmental Implications of Reducing the Platinum Group Metal Loading in Fuel Cells and Electrolysers: Anion Exchange Membrane versus Proton Exchange Membrane Cells. Sustainable Energy Technologies and Assessments, v. 56, 2023.

SIMONS, A.; BAUER, C. A Life-Cycle Perspective on Automotive Fuel Cells. Applied Energy, v. 157, p. 884–96, 2015. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.049.

SPANOS, C.; TURNEY, D. E.; FTHENAKIS, V. Life-cycle analysis of flow-assisted nickel zinc-manganese dioxide-, and valve-regulated lead-acid batteries designed for demand-charge reduction. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 43, p.478-494, 2015.

STROPNIK, R. et al. Critical Materials in PEMFC Systems and a LCA Analysis for the Potential Reduction of Environmental Impacts with EoL Strategies. Energy Science and Engineering, v.7, n. 6, p. 2519–39, 2019. https://doi.org/10.1002/ese3.441.

USAI, L. et al. Life Cycle Assessment of Fuel Cell Systems for Light Duty Vehicles, Current State-of-the-Art and Future Impacts. Journal of Cleaner Production, v. 280, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125086.

VDMA, 2022. International Technology Roadmap for Photovoltaics ITRPV

VDMA, 2025. International Technology Roadmap for Photovoltaics ITRPV

Anexo 4 – Criticalidade tecnológica

Baterias

Tabela 20 – Criticalidade da Bateria LFP.

LFP	Cobre	Ferro	Lítio	Grafita	Fósforo	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	0,45	0,30	0,08	1,00	0,38	-
Criticalidade elementar	2	-	36	8	-	-
Contribuição	0,90	-	2,88	8,00	-	11,78

Tabela 21 - Criticalidade da Bateria LMFP.

LMFP	Cobre	Ferro	Lítio	Manganês	Grafita	Fósforo	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	0,48	0,3	0,08	0,30	0,96	0,35	-
Criticalidade elementar	2	-	36	2	8	-	-
Contribuição	0,96	-	2,88	0,60	7,68	-	12,12

Tabela 22 – Criticalidade da Bateria NMC-111.

NMC-111	Cobalto	Lítio	Manganês	Grafita	Níquel	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	0,32	0,11	0,31	0,90	0,32	-
Criticalidade elementar	60	36	2	8	6	-
Contribuição	19,20	3,96	0,62	7,20	1,92	32,9

Tabela 23 - Criticalidade da Bateria NMC-333.

NMC-333	Cobalto	Lítio	Manganês	Grafita	Níquel	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	0,35	0,13	0,33	0,98	0,35	-
Criticalidade elementar	60	36	2	8	6	-
Contribuição	21,00	4,68	0,66	7,84	2,10	36,28

Tabela 24 - Criticalidade da Bateria NMC-532.

NMC-532	Cobalto	Cobre	Lítio	Manganês	Grafita	Níquel	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	0,20	0,32	0,12	0,28	0,90	0,45	-
Criticalidade elementar	60	2	36	2	8	6	-
Contribuição	12,00	0,64	4,32	0,56	7,20	2,70	27,42

-

Tabela 25 - Criticalidade da Bateria NMC-622.

NMC-622	Cobalto	Cobre	Lítio	Manganês	Grafita	Níquel	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	0,17	0,31	0,12	0,18	0,9	0,52	-
Elemental Score	60	2	36	2	8	6	-
Score	10,20	0,62	4,32	0,36	7,2	3,12	25,82

Tabela 26 – Criticalidade da Bateria NMC-811.

NMC-811	Cobalto	Cobre	Lítio	Manganês	Grafita	Níquel	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	0,08	0,27	0,1	0,08	0,9	0,65	-
Criticalidade elementar	60	2	36	2	8	6	-
Contribuição	4,80	0,54	3,60	0,16	7,20	3,90	20,20

Tabela 27 - Criticalidade da Bateria NMC-955.

NMC-955	Cobalto	Lítio	Manganês	Grafita	Níquel	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	0,04	0,09	0,04	0,9	0,82	-
Criticalidade elementar	60	36	2	8	6	-
Contribuição	2,40	3,24	0,08	7,20	4,92	17,84

Tabela 28 - Criticalidade da Bateria NCA.

NCA	Cobalto	Cobre	Lítio	Grafita	Níquel	Criticalidade
Material Intensity	0,13	0,30	0,10	0,90	0,70	-
Criticalidade elementar	60	2	36	8	6	-
Contribuição	7,80	0,60	3,60	7,20	4,20	23,40

Tabela 29 - Criticalidade da Bateria Chumbo-Ácido.

Chumbo-ácido	Chumbo	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	18,40	-
Criticalidade elementar	12	-
Contribuição	220,80	220,80

Tabela 30 - Criticalidade da Bateria Íon-Sódio.

Na-ion	Manganês	Níquel	Sódio	Criticalidade
Intensidade Material (kg/kwh)	0,60	0,50	0,50	-
Criticalidade elementar	2	6	-	-
Contribuição	1,20	3,00	-	4,20

Pilha a Combustível

Tabela 31- Criticalidade da pilha a combustível PEMFC.

PEMFC	Platinum	Criticalidade
Intensidade material (kg/kW)	0,0006	-
Criticalidade elementar	50	-
Contribuição	0,03	0,03

Motores Elétricos

Tabela 32 – Criticalidade do Motor IM.

IM	Cobre	Criticalidade
Intensidade material (kg/kW)	0,16	-
Criticalidade elementar	2	-
Contribuição	0,32	0,32

Tabela 33 – Criticalidade do Motor SRM.

SRM	Cobre	Criticalidade
Intensidade material (kg/kW)	0,17	-
Criticalidade elementar	2	-
Contribuição	0,33	0,33

Tabela 34 - Criticalidade do motor PMSM.

PMSM NdFeB	Cobre	Ímã Permanente	Criticalidade
Intensidade material (kg/kW)	0,09	1,26	-
Criticalidade elementar	2	27,30	-
Contribuição	0,18	0,43	0,61

Células Fotovoltaicas

Tabela 35 – Criticalidade da célula Mono-Si.

Mono-Si	Alumínio	Silício	Prata	Criticalidade
Intensidade material (Ton/GW)	35,00	1.915,00	12,85	-
Criticalidade elementar	2	10	8	-
Contribuição	0,07	19,15	0,10	19,32

Tabela 36 – Criticalidade da célula Perovskite/Si.

Perovskite/Si	Alumínio	Silício	Prata	Criticalidade
Intensidade material (Ton/GW)	25.00	1,352.00	9.00	-
Criticalidade elementar	2	10	8	-
Contribuição	0,05	13,52	0,07	13,64

Tabela 37 - Criticalidade da célula CdTe.

CdTe	Cádmio	Telúrio	Criticalidade
Intensidade material (Ton/GW)	27,85	34,46	-
Criticalidade elementar	60	75	-
Contribuição	1,67	2,58	4,26

Tabela 38 - Criticalidade da célula CIGS.

CIGS	Cobre	Gálio	Índio	Selênio	Criticalidade
Intensidade material (Ton/GW)	24,00	7,00	27,00	17,40	-
Criticalidade elementar	2	125	100	75	-
Contribuição	0,05	0,88	2,70	1,31	4,93

Geradores Eólicos

Tabela 39 – Criticalidade do Gerador DFIG.

DFIG	Cobre	Criticalidade
Material Intensity	0,46	-
Criticalidade elementar	2	-
Contribuição	0,91	0,91

Tabela 40 – Criticalidade do Gerador PMSG-DD

PMSG-DD	Cobre	Ímã Permanente	Criticalidade
Material Intensity	1,25	650,00	-
Criticalidade elementar	2	27	-
Contribuição	2,51	17,75	20,26

Tabela 41 – Criticalidade do Gerador PMSG-1G

PMSG-1G	Cobre	Ímã Permanente	Criticalidade
Material Intensity	1,25	160.00	-
Criticalidade elementar	2	27	-
Contribuição	2,51	4,37	6,88

Tabela 42 – Criticalidade do Gerador PMSG-3G

PMSG-3G	Cobre	Ímã Permanente	Criticalidade
Material Intensity	1,25	80,00	-
Criticalidade elementar	2	27	-
Contribuição	2,51	2,18	4,69

Ímã Permanente

Tabela 43 – Criticalidade do Ímã Permanente NdFeB

Ímã Permanente NdFeB	Neodímio	Ferro	Boro	Praseodímio	Disprósio	Cobalto	Samário	Nióbio	Gadolínio	Cobre	Alumínio	Níquel	Criticalidade
Intensidade material (kg/kg)	0,236	0,651	0,010	0,023	0,049	0,022	0,001	0,001	0,003	0,0003	0,004	0.002	-
Elemental Score	80	-	6	80	100	60	100	15	100	2	2	6	-
Contribuição	18,85	-	0,06	1,82	4,87	1,30	0,128	0,022	0,26	0,00	0,01	0,01	27,30