



# RIO

# PUC

Dissertação de Mestrado

## **Modelagem de dinâmica de sistemas para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil: Uma abordagem integrada com cenários prospectivos até 2050**

Lucas Aló Rodrigues Araujo da Silva

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro  
Centro Técnico Científico  
Programa de Pós-graduação em Metrologia

Rio de Janeiro, 29 de setembro de 2025



Pontifícia  
Universidade  
Católica do  
Rio de Janeiro

Dissertação de Mestrado

# **Modelagem de dinâmica de sistemas para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil: Uma abordagem integrada com cenários prospectivos até 2050**

Lucas Aló Rodrigues Araujo da Silva

Orientação: Professor Rodrigo Flora Calili, D.Sc.

Coorientação: Professora Maria Fatima Ludovico de Almeida, D.Sc.

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 29 de setembro de 2025



Pontifícia  
Universidade  
Católica do  
Rio de Janeiro

# **Modelagem de dinâmica de sistemas para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil: Uma abordagem integrada com cenários prospectivos até 2050**

Lucas Aló Rodrigues Araujo da Silva

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.  
Aprovada pela Comissão examinadora abaixo:

**Professor Rodrigo Flora Calili, D. Sc.**

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

**Professora Maria Fatima Ludovico de Almeida, D.Sc.**

Co-Orientadora

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

**Professor Florian Alain Yannick Pradelle, D.Sc.**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Professor Samuel Moreira Duarte Santos, D.Sc.**

Universidade Federal Fluminense – UFF

**Professor Carlos Aparecido Ferreira, D.Sc.**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Rio de Janeiro, 29 de setembro de 2025



Pontifícia  
Universidade  
Católica do  
Rio de Janeiro

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

### Lucas Aló Rodrigues Araujo da Silva

Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Veiga de Almeida, Brasil (2018). Atualmente, Técnico de Manutenção –Instrumentação da Petróleo Brasileiro S.A).

#### Ficha Catalográfica

Silva, Lucas Aló Rodrigues Araujo da

Modelagem de dinâmica de sistemas para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil: Uma abordagem integrada com cenários prospectivos até 2050/ Lucas Aló Rodrigues Araujo da Silva; orientadores: Rodrigo Flora Calili. Maria Fatima Ludovico de Almeida. – 2025.

170 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2025.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação – Teses. 3. Eficiência energética. 4. Motores elétricos. 5. Efeitos rebote. 6. Cenários prospectivos. I. Rodrigo Flora Calili. II. Almeida, Maria Fatima Ludovico de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. IV. Título.

CDD: 389.1

## Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria, força e inspiração.

À minha família e amigos, meu alicerce. Em especial, à minha esposa Bruna, que há mais de 15 anos caminha ao meu lado com amor, paciência e dedicação. Sua presença constante, apoio incondicional e carinho foram fundamentais em cada etapa deste processo. À minha filha Luna, que chegou recentemente e já transformou minha vida em uma explosão de alegria e amor. Você me dá ainda mais motivos para seguir em frente e buscar novos desafios com coragem e esperança.

Aos meus pais, Luciana e Geraldo, por todo o amor, incentivo e apoio ao longo da vida. Vocês são minha base e minha inspiração. Às minhas irmãs Ana Clara e Mariana, por todo o carinho, paciência e cumplicidade. Ao meu irmão Alexandre, por nossa amizade, companheirismo e pelas histórias que construímos juntos.

Aos meus afilhados Inácio José, Giovanna e Marina, que alegram minha vida com sua presença doce e especial. Vocês são luz nos meus dias.

Aos meus orientadores, Prof. Rodrigo Flora Calili e Prof<sup>a</sup> Fátima Ludovico, minha eterna gratidão. Obrigado pelo apoio, pelos ensinamentos, pela paciência e pela confiança depositada em mim. A trajetória acadêmica de vocês é inspiradora, e tê-los como guias nesta jornada foi uma honra.

Aos docentes e funcionários do Pós MQI, pela dedicação, apoio e pelo conhecimento compartilhado ao longo do mestrado. Em especial, ao Prof. Carlos Hall, Prof. Daniel Lousada e Prof. Reinaldo Souza, pela disponibilidade e incentivo constante.

Ao Cel Eifler, pela confiança no meu trabalho e por proporcionar a oportunidade de realizar este mestrado. Sua crença no meu potencial foi essencial.

Aos amigos Caio, Hugo, Mauro, Alan e Vanessa — pela amizade, apoio constante e incentivo ao longo dessa jornada. Sou grato por cada gesto, conversa e parceria que tornaram esse caminho mais leve e significativo.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## Resumo

Silva, Lucas Aló Rodrigues da; Calili, Rodrigo Flora (Orientador), Maria Fatima Ludovico de (Co-orientadora). **Modelagem de dinâmica de sistemas para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil: Uma abordagem integrada com cenários prospectivos até 2050.** Rio de Janeiro, 2025. 170 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O setor industrial brasileiro responde por aproximadamente 36 % do consumo total de eletricidade do país, dos quais 68 % são destinados a sistemas motrizes. Isso evidencia a importância estratégica de aprimorar a eficiência energética dos motores elétricos industriais. No entanto, tais avanços podem paradoxalmente desencadear efeitos rebote, fenômeno descrito pelo Paradoxo de Jevons, em que ganhos de eficiência podem levar ao aumento do consumo total de energia. Esta dissertação tem como objetivo desenvolver e validar empiricamente um modelo conceitual baseado na dinâmica de sistemas integrada à prospectiva estratégica para caracterizar e quantificar os efeitos rebote decorrentes de melhorias na eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050. Foram construídos quatro cenários prospectivos para examinar diferentes trajetórias de eficiência e estimar os efeitos rebote correspondentes no contexto brasileiro. Os resultados confirmaram a hipótese central de que fatores institucionais, tecnológicos e econômicos exercem influência decisiva sobre a manifestação e intensidade dos efeitos rebote. O Cenário 1 (Regulamentação seletiva) apresentou efeito rebote mínimo (6 %), economia de energia de 18 % e benefício líquido de 17 %. O Cenário 2 (Transição regulatória) mostrou um efeito rebote moderado (40 %), economia de 32 % e benefício líquido de 19 %. Já o Cenário 3 (Regulamentação rigorosa com paradoxo), apesar da alta economia (47 %), apresentou um efeito rebote intenso (85 %), praticamente anulando os ganhos, com benefício líquido de apenas 7 %. Por fim, no Cenário 4 (Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável), estimou-se um efeito rebote controlado (28 %) por meio de políticas integradas, resultando no maior benefício líquido (32 %). A principal contribuição deste trabalho reside na capacidade de antecipar e quantificar efeitos rebote, possibilitando intervenções preventivas no desenho de políticas nacionais de eficiência energética.

## Palavras-chave

Metrologia; eficiência energética; motores elétricos; efeitos rebote; dinâmica de sistemas; cenários prospectivos.

## Abstract

Silva, Lucas Alo Rodrigues Araujo da; Calili, Rodrigo Flora (Supervisor); Almeida, Maria Fatima Ludovico de (Co-supervisor). **System Dynamics Modelling for Estimating Rebound Effects of Energy Efficiency in Industrial Electric Motors in Brazil: An Integrated Approach with Prospective Scenarios up to 2050**. Rio de Janeiro, 2025. 170 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The Brazilian industrial sector accounts for approximately 36 % of the country's total electricity consumption, of which 68 % is allocated to motor-driven systems. This highlights the strategic importance of improving the energy efficiency of industrial electric motors. However, such advancements may paradoxically trigger rebound effects, a phenomenon described by the Jevons Paradox, where efficiency gains can lead to increased overall energy consumption. This dissertation aims to develop and empirically validate a conceptual model based on system dynamics integrated with strategic foresight to characterise and quantify rebound effects resulting from improvements in the energy efficiency of industrial electric motors in Brazil through 2050. Four prospective scenarios were constructed to examine different trajectories of motor efficiency and estimate corresponding rebound effects within the Brazilian context. Results confirmed the central hypothesis that institutional, technological, and economic factors increase the rebound effects. Scenario 1 (Selective Regulation) showed a minimal rebound effect (6 %), with energy savings of 18 %, and a net benefit of 17 %. Scenario 2 (Regulatory Transition) presented a moderate rebound effect (40 %), savings of 32 %, and a net benefit of 19 %. Scenario 3 (Strict Regulation with Paradox), despite high savings (47 %), experienced a big rebound effect (85 %), nearly nullifying efficiency gains, with a net benefit of only 7 %. Finally, Scenario 4 (Effective Regulation with Sustainable Balance) achieved a controlled rebound effect (28 %) through integrated policies, resulting in the highest net benefit (32 %). The main contribution of this work lies in anticipating and quantifying rebound effects, enabling preventive interventions in the design of national energy efficiency policies.

## Keywords

Metrology; energy efficiency; electric motors; rebound effects; system dynamics; prospective scenarios.

## Sumário

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Introdução                                                                                   | 13 |
| 1.1. Definição do problema de pesquisa                                                         | 18 |
| 1.2. Objetivos: geral e específicos                                                            | 19 |
| 1.3. Metodologia                                                                               | 20 |
| 1.3.1. Fase exploratória e descritiva                                                          | 20 |
| 1.3.2. Fase de pesquisa aplicada                                                               | 21 |
| 1.3.3. Fase conclusivo-propositiva                                                             | 21 |
| 1.4. Estrutura da dissertação                                                                  | 22 |
| 2 Referencial teórico sobre estimativa de efeitos rebote da eficiência energética na indústria | 25 |
| 2.1. Fundamentação teórica do efeito rebote da eficiência energética                           | 25 |
| 2.2. Classificação e tipologia dos efeitos rebote                                              | 28 |
| 2.2.1. Efeitos rebote diretos                                                                  | 29 |
| 2.2.2. Efeitos rebote indiretos                                                                | 30 |
| 2.2.3. Efeitos rebote macroeconômicos                                                          | 31 |
| 2.2.4. Efeitos rebote comportamentais                                                          | 31 |
| 2.2.5. Tipologias ampliadas e classificações híbridas                                          | 32 |
| 2.3. Mecanismos e determinantes dos efeitos rebote da eficiência energética                    | 32 |
| 2.3.1. Mecanismos de formação dos efeitos rebote                                               | 33 |
| 2.3.2. Determinantes econômicos dos efeitos rebote                                             | 34 |
| 2.3.3. Determinantes tecnológicos dos efeitos rebote                                           | 35 |
| 2.3.4. Determinantes comportamentais dos efeitos rebote                                        | 35 |
| 2.3.5. Determinantes institucionais e regulatórios dos efeitos rebote                          | 36 |
| 2.3.6. Visão teórica integrada dos efeitos rebote                                              | 36 |
| 2.4. Abordagens metodológicas: quantitativas e sistêmicas                                      | 37 |
| 2.4.1. Abordagens quantitativas                                                                | 38 |
| 2.4.2. Abordagens sistêmicas                                                                   | 39 |
| 2.5. Evidências empíricas de efeitos rebote da eficiência energética na indústria              | 40 |

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.1. Evidências internacionais                                                                                          | 44 |
| 2.5.2. Evidências em países emergentes                                                                                    | 45 |
| 2.5.3. Evidências no Brasil                                                                                               | 46 |
| 2.5.4. Papel das políticas públicas nas evidências empíricas                                                              | 46 |
| 2.6. Medidas para mitigação de efeitos rebote da eficiência energética na indústria                                       | 47 |
| 2.6.1. Princípios orientadores da mitigação                                                                               | 48 |
| 2.6.2. Instrumentos regulatórios                                                                                          | 48 |
| 2.6.3. Instrumentos fiscais e de mercado                                                                                  | 49 |
| 2.6.4. Subsídios e incentivos condicionados                                                                               | 49 |
| 2.6.5. Medidas de informação e mudança comportamental                                                                     | 50 |
| 2.6.6. Abordagens tecnológicas e de inovação sistêmica                                                                    | 50 |
| 2.6.7. Limitações das medidas para mitigação de efeitos rebote na indústria                                               | 50 |
| 2.7. Considerações finais do capítulo                                                                                     | 52 |
| 3 Modelo conceitual para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil | 55 |
| 3.1. Visão geral do modelo                                                                                                | 55 |
| 3.2. Módulo de prospectiva estratégica para construção de cenários futuros                                                | 57 |
| 3.2.1. Definição das questões norteadoras e horizonte temporal                                                            | 57 |
| 3.2.2. Recenseamento e classificação das variáveis-chave: uso da análise estrutural                                       | 58 |
| 3.2.3. Identificação dos principais <i>stakeholders</i>                                                                   | 61 |
| 3.2.4. Caracterização sistemática da situação atual                                                                       | 62 |
| 3.2.5. Identificação dos principais condicionantes do futuro                                                              | 62 |
| 3.2.6. Construção dos cenários prospectivos                                                                               | 63 |
| 3.3. Módulo de dinâmica de sistemas integrada à perspectiva estratégica                                                   | 68 |
| 3.3.1. Filosofia e fundamentos da dinâmica de sistemas                                                                    | 69 |
| 3.3.2. Estruturação conceitual do modelo de dinâmica de sistemas                                                          | 70 |
| 3.3.3. Identificação dos estoques fundamentais                                                                            | 71 |
| 3.3.4. Especificação dos fluxos principais                                                                                | 71 |
| 3.3.5. Mapeamento das estruturas de retroalimentação                                                                      | 72 |
| 3.3.6. Parametrização baseada em cenários prospectivos                                                                    | 73 |
| 3.3.7. Especificação das equações estruturais do modelo                                                                   | 74 |
| 3.3.8. Formulação dos atrasos temporais e ajustes não-lineares                                                            | 78 |

|                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3.9. Validação e calibração do modelo                                                                    | 79  |
| 3.3.10. Simulação e análise de resultados segundo a abordagem sistêmica híbrida                            | 80  |
| 3.4. Considerações finais sobre o capítulo                                                                 | 81  |
| 4 Validação empírica do modelo conceitual                                                                  | 83  |
| 4.1. Resultados do módulo de prospectiva estratégica para construção de cenários futuros                   | 83  |
| 4.1.1. Definição das questões norteadoras e horizonte temporal                                             | 84  |
| 4.1.2. Definição e classificação das variáveis-chave: uso da análise estrutural                            | 86  |
| 4.1.3. Identificação dos principais <i>stakeholders</i>                                                    | 89  |
| 4.1.4. Caracterização da situação atual (2025)                                                             | 91  |
| 4.1.5. Identificação dos principais condicionantes do futuro                                               | 97  |
| 4.1.6. Construção de cenários prospectivos                                                                 | 101 |
| 4.2. Resultados do módulo de dinâmica de sistemas integrada à prospectiva estratégica                      | 113 |
| 4.2.1. Modelo da dinâmica sistêmica da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil    | 114 |
| 4.2.2. Determinação da linha de base                                                                       | 118 |
| 4.2.3. Configuração dos parâmetros do modelo dinâmico prospectivo                                          | 121 |
| 4.2.4. Participação de mercado dos motores elétricos industriais                                           | 128 |
| 4.2.5. Consumo energético dos motores elétricos industriais ( <i>ECC<sub>nt</sub></i> )                    | 141 |
| 4.2.6. Energia conservada <i>ENCO<sub>Cn</sub></i>                                                         | 142 |
| 4.2.7. Efeito rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais em cada cenário prospectivo | 145 |
| 4.3. Discussão dos resultados                                                                              | 151 |
| 4.3.1. Diferenciais metodológicos e empíricos do modelo proposto                                           | 152 |
| 4.3.2. Comparação com os estudos prévios                                                                   | 153 |
| 4.3.3. Implicações para políticas públicas, reguladores e gestores industriais                             | 153 |
| 4.3.4. Limitações da pesquisa                                                                              | 154 |
| 5 Conclusões                                                                                               | 156 |
| Referências bibliográficas                                                                                 | 161 |
| Apêndice A1 – Estratégias de busca em bases de dados de literatura científica                              | 164 |

## Lista de figuras

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1.1 – Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos                                                                                        | 12  |
| Figura 3.1 – Modelo conceitual para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil até 2050 | 56  |
| Figura 3.2 – Mapa genérico de influência-dependência das variáveis-chave                                                                            | 60  |
| Figura 3.3 – Matriz morfológica genérica para a construção de cenários prospectivos                                                                 | 66  |
| Figura 4.1 – Matriz de influência direta (MDI) das variáveis-chave                                                                                  | 86  |
| Figura 4.2 – Matriz de influência Indireta (MII) das variáveis-chave                                                                                | 87  |
| Figura 4.3 – Mapa de influência-dependência indireta                                                                                                | 88  |
| Figura 4.4 – Matriz morfológica referente ao Cenário 1: ‘Regulamentação seletiva’                                                                   | 103 |
| Figura 4.5 – Matriz morfológica referente ao Cenário 2: ‘Transição regulatória’                                                                     | 104 |
| Figura 4.6 – Matriz morfológica referente ao Cenário 3: ‘Regulamentação rigorosa com paradoxo’                                                      | 105 |
| Figura 4.7 – Matriz morfológica referente ao Cenário 4: ‘Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável’                                         | 106 |
| Figura 4.8 – Diagrama de retroalimentação CLD no modelo da dinâmica sistêmica da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil   | 115 |
| Figura 4.9 – Modelo completo da dinâmica sistêmica da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil                              | 116 |
| Figura 4.10 – Projeção do número de motores elétricos industriais no Brasil até 2050                                                                | 119 |
| Figura 4.11 – Projeções do mercado de motores elétricos industriais no Brasil por categoria de motores elétricos industriais                        | 120 |
| Figura 4.12 – Consumo de energia elétrica dos motores elétricos industriais no Brasil até 2050                                                      | 121 |
| Figura 4.13 – Participação de mercado dos motores elétricos industriais em cada cenário prospectivo                                                 | 131 |
| Figura 4.14 – Energia consumida dos motores importados de baixa qualidade                                                                           | 132 |
| Figura 4.15 – Consumo médio dos motores importados de baixa qualidade                                                                               |     |

|                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                                  | 133 |
| Figura 4.16 – Número de motores importados de baixa qualidade                    | 134 |
| Figura 4.17 – Energia consumida dos motores novos                                | 135 |
| Figura 4.18 – Consumo médio dos motores novos                                    | 136 |
| Figura 4.19 – Número de motores novos                                            | 136 |
| Figura 4.20 – Energia consumida dos motores em operação                          | 137 |
| Figura 4.21 – Consumo médio dos motores em operação                              | 138 |
| Figura 4.22 – Número de motores em operação                                      | 138 |
| Figura 4.23 – Energia consumida dos motores reconicionados                       | 139 |
| Figura 4.24 – Consumo médio dos motores reconicionados                           | 140 |
| Figura 4.25 – Número de motores reconicionados                                   | 141 |
| Figura 4.26 – Consumo de eletricidade <i>ECCnt</i> em cada cenário prospectivo   | 142 |
| Figura 4.27 – Energia conservada <i>ENCOCnt</i> em cada ano até 2050.            | 144 |
| Figura 4.28 – Energia conservada <i>ENCOCnt</i> acumulado até 2050.              | 144 |
| Figura 4.29 – Efeitos rebote no cenário 1, considerando a variável ENCO = 2,5 %  | 146 |
| Figura 4.30 – Efeitos rebote no cenário 2, considerando a variável ENCO = 7,5 %  | 147 |
| Figura 4.31 – Efeitos rebote no cenário 3, considerando a variável ENCO = 10 %   | 148 |
| Figura 4.32 – Efeitos rebote no cenário 4, considerando a variável ENCO = 22,5 % | 150 |

## Lista de quadros

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 2.1 – Evidências empíricas relativas à estimativa de efeitos rebote da eficiência energética na indústria                                  | 42  |
| Quadro 3.1 – Descrição das variáveis-chave dos cenários prospectivos de eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil    | 58  |
| Quadro 4.1 – Principais <i>stakeholders</i> e influenciadores do futuro da eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil | 89  |
| Quadro 4.2 – Situação atual das variáveis-chave do sistema (2025)                                                                                 | 92  |
| Quadro 4.3 – Comparação entre os consumos médios de cada tipo de motor até 2050                                                                   | 142 |

## Lista de tabelas

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 4.1 – Parâmetros estatísticos para a projeção do mercado de motores elétricos industriais             | 119 |
| Tabela 4.2 – Estimativa do consumo médio/motor da linha de base                                              | 120 |
| Tabela 4.3 – Fatores das variáveis-chave do modelo no cenário 1: Regulamentação seletiva                     | 123 |
| Tabela 4.4 – Fatores das variáveis do modelo no cenário 2: Transição regulatória                             | 125 |
| Tabela 4.5 – Fatores das variáveis do modelo no cenário 3: Regulamentação rigorosa com paradoxo              | 127 |
| Tabela 4.6 – Fatores das variáveis do modelo no cenário 4: Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável | 128 |

## Lista de siglas

ABESCO – Abesco Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de Energia

ABIMAQ – Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV – Avaliação de ciclo de vida

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CAPEX – *Capital Expenditure*

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CGE – *Computable General Equilibrium*

CGIEE – Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética

CLD – *Causal Loop Diagrams*

CNI – Confederação Nacional da Indústria

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ESG – *Environmental, Social, and Governance*

EU ETS - EU Emissions Trading System

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

GEE – Gases com efeito de estufa

ICT – Instituição de Ciência e Tecnologia

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

ISO – *International Organization for Standardization*

IoT – Internet das Coisas

LIPSOR – Laboratoire d'Investigation en Prospective et Stratégie et d'Organisation

LED – *Light Emitting Diode*

MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

MDIC – Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços

MICMAC – *Matrice d'Impacts Croisés Multiplication Appliquée au Classement*

MMA – Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima

MME – Ministério de Minas e Energia

MS – Microsoft

OIE – Oferta Interna de Energia

ONG – Organização não governamental

OPEX – *Operational Expenditure*

PBE – Programa Brasileiro de Etiquetagem

PDE 2034 – Plano Decenal de Expansão de Energia 2034

PIB – Produto Interno Bruto

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

tep – toneladas equivalentes de petróleo

TIC – Tecnologias da informação e comunicação

TWh – terawatts-hora

UE – União Europeia

# 1

## Introdução

A eficiência energética constitui determinante fundamental da competitividade industrial contemporânea, influenciando múltiplas dimensões do desempenho empresarial. Do ponto de vista econômico direto, melhorias de eficiência energética reduzem custos operacionais, liberando recursos financeiros para investimentos em outras atividades produtivas. Para indústrias intensivas em energia, como siderurgia, química e cimento, os custos energéticos podem representar 20-40 % dos custos totais de produção, tornando a eficiência energética fator crítico de competitividade (CNI, 2009).

A competitividade derivada da eficiência energética manifesta-se através de múltiplos canais. Primeiro, menores custos energéticos proporcionam maior flexibilidade de preços, permitindo estratégias competitivas mais agressivas ou margens de lucro superiores. Segundo, empresas energeticamente eficientes apresentam menor volatilidade de custos, proporcionando previsibilidade financeira que facilita planejamento estratégico e acesso a financiamentos. Terceiro, eficiência energética frequentemente correlaciona-se com eficiências operacionais mais amplas, resultando em melhorias de produtividade e qualidade.

Evidências empíricas da relação entre eficiência energética e competitividade são apresentadas por Fortes et al. (2020), que analisaram o impacto econômico da utilização de motores de alto rendimento na indústria brasileira. O estudo demonstrou que substituições de motores padrão por motores de alta eficiência resultaram em economias médias de 3–8 % nos custos operacionais, com períodos de retorno do investimento variando entre 2–5 anos, dependendo do regime de operação. Esses resultados reforçam a relevância de estratégias voltadas à redução do consumo energético como fator de competitividade industrial.

Nesse contexto, antes de direcionar investimentos significativos em CAPEX (*Capital Expenditure*) — gastos relacionados à aquisição ou melhoria de ativos de longo prazo — é fundamental avaliar o potencial de conservação energética via OPEX (*Operational Expenditure*), que abrange despesas operacionais recorrentes.

Medidas de gestão e ajustes operacionais podem gerar ganhos expressivos com menor custo e maior agilidade de implementação, configurando uma etapa preliminar estratégica. Essa abordagem preventiva não elimina, entretanto, a necessidade de políticas estruturadas para substituição de motores elétricos por modelos mais eficientes, especialmente em setores industriais de alta intensidade energética, onde o impacto do consumo é crítico. Assim, a análise integrada de OPEX e CAPEX torna-se essencial para maximizar benefícios econômicos e ambientais.

Igualmente, a dimensão da sustentabilidade ambiental da eficiência energética ganhou crescente importância nas últimas décadas, particularmente no contexto das mudanças climáticas e dos compromissos globais de descarbonização. Melhorias de eficiência energética na indústria contribuem para a sustentabilidade por múltiplos mecanismos: reduções no consumo energético diminuem diretamente as emissões de CO<sub>2</sub> associadas à geração de energia, especialmente em sistemas com alta participação de combustíveis fósseis; adicionalmente, menor demanda energética reduz pressões sobre recursos naturais e ecossistemas vinculados à extração e processamento de combustíveis. Dessa forma, a eficiência energética não apenas promove ganhos econômicos, mas também desempenha papel central na mitigação dos impactos ambientais da atividade industrial.

O conceito de sustentabilidade industrial contemporâneo integra considerações energéticas com princípios de economia circular e análise de ciclo de vida. Esta perspectiva holística reconhece que eficiência energética verdadeira requer otimização não apenas do consumo operacional, mas também da energia incorporada em materiais, equipamentos e infraestrutura. Consequentemente, estratégias de eficiência energética industrial crescentemente enfatizam durabilidade, reciclabilidade e minimização de desperdícios.

O setor industrial brasileiro responde por aproximadamente 36 % do consumo total de energia elétrica do país, sendo que cerca de 68 % da eletricidade consumida destina-se a aplicações de sistemas motrizes, conferindo importância estratégica ao aprimoramento da eficiência energética dos motores elétricos industriais no país (EPE, 2025). Esta realidade confere centralidade à busca pela eficiência energética nesses sistemas, sobretudo frente ao aumento dos custos de energia, à pressão por práticas industriais sustentáveis – com destaque para os compromissos de descarbonização firmados no Acordo de Paris – e à escalada de exigências regulatórias nacionais e internacionais sobre o desempenho ambiental do setor

produtivo.

Estudos recentes apontam que a adoção de medidas de eficiência energética pode resultar em economias médias de até 40 % no consumo de eletricidade industrial. Iniciativas concretas vão desde a substituição de motores antigos por modelos de alto rendimento, o ajuste da curva de carga e a especificação correta do motor, passando pela instalação de inversores de frequência e automação industrial, até a implementação de modernos sistemas de gestão de energia e estratégias de recuperação de calor residual.

Contudo, o avanço da eficiência energética industrial, ao contrário do que se poderia esperar de uma redução linear no consumo, encontra obstáculos analíticos e práticos relacionados ao chamado efeito rebote -- fenômeno teorizado por William Stanley Jevons em 1866 e detalhadamente explorado em estudos recentes, tanto nacionais quanto internacionais. O chamado Paradoxo de Jevons postula que melhorias tecnológicas que reduzem o custo de uso de uma energia ou recurso tendem a estimular seu consumo agregado, o que pode anular -- ou até sobrepôr -- as economias energéticas previstas pelas políticas de eficiência energética (Jevons, 1866; Brockway et al., 2021).

No setor industrial, este efeito é potencializado pela competitividade, pressão por aumento de produção e acesso a incentivos para a substituição de equipamentos motrizes, levando à expansão do uso dos motores eficientes ao invés de mera substituição tecnológica em bases estáveis. A literatura contemporânea identifica múltiplos mecanismos pelos quais esses efeitos se manifestam: efeitos rebote diretos, quando a redução dos custos marginais estimula maior utilização; efeitos rebote indiretos, quando recursos economizados são realocados para outros consumos energéticos; efeitos rebote macroeconômicos, quando ganhos setoriais induzem crescimento econômico que amplia a demanda agregada; e efeitos rebote comportamentais, quando percepções de legitimidade ambiental estimulam padrões de uso mais intensivos (Greening et al., 2000; Sorrell, 2007; Vivanco et al., 2018).

Evidências empíricas demonstram que a magnitude desses efeitos varia significativamente entre setores e países. Estudos europeus apontam efeitos rebote entre 10 % e 70 % na indústria, com alguns casos chegando ao *backfire* -- situação em que o consumo final supera o consumo anterior às melhorias de eficiência (Broberg et al., 2015; Zimmermann et al., 2021). Na China, Li e Lin (2017) identificaram efeitos rebote de 50-80 % em subsetores pesados da indústria, enquanto

Lutz et al. (2021) observaram variações setoriais significativas na Alemanha, com efeitos rebote elevados em química e metalurgia e menores em subsetores menos intensivos em energia.

No contexto brasileiro, esse paradoxo assume especial relevância frente ao perfil expansionista da indústria e à presença de políticas públicas e linhas de crédito que favorecem a modernização dos equipamentos motrizes, sem, no entanto, equilibrar tais incentivos com instrumentos regulatórios robustos que restrinjam ou orientem o consumo futuro resultante das melhorias tecnológicas. O Plano Nacional de Energia 2050 (Brasil, 2020) reconhece que a ausência de diretrizes coercitivas pode estimular justamente comportamentos "pro-cíclicos" e comprometer as metas de conservação estabelecidas nacionalmente.

Diante desse cenário, compreender, caracterizar e quantificar os efeitos rebote oriundos da difusão de tecnologias eficientes em motores elétricos industriais no Brasil torna-se imprescindível para a avaliação realista de políticas públicas e para o desenho de estratégias que otimizem os ganhos energéticos líquidos.

Esse plano reconhece que decisões tomadas no presente, especialmente no que tange à eficiência energética e à modernização tecnológica, possuem impactos cumulativos e estruturantes que se manifestam ao longo de décadas. Ao projetar cenários até 2050, é possível incorporar variáveis complexas como crescimento industrial, evolução tecnológica dos motores elétricos, políticas públicas de sustentabilidade e mudanças nos padrões de consumo energético. Além disso, o horizonte 2050 permite avaliar com maior profundidade os efeitos rebote associados à eficiência energética, considerando dinâmicas sistêmicas que se desenvolvem gradualmente. Assim, as modelagens que se inserem em um contexto estratégico nacional, contribuem com análises integradas que dialogam diretamente com os objetivos de planejamento energético de longo prazo do Brasil.

A literatura recente tem ressaltado a necessidade de desenvolver abordagens sistêmicas híbridas que integrem ferramentas de *forecasting* e *foresight*, de modo a conferir maior robustez às análises dos efeitos rebote da eficiência energética na indústria. Essa integração permite não apenas caracterizar com mais precisão os mecanismos subjacentes ao fenômeno, mas também antecipar pontos críticos e identificar oportunidades de otimização das políticas nacionais de eficiência energética.

Estudos como os de Ahmadi Achachlouei e Hilty (2014), Guzzo et al. (2024)

e Amjadi et al. (2022) demonstram que abordagens sistêmicas conseguem capturar retroalimentações complexas entre eficiência, custos, produção e políticas, oferecendo informações relevantes impossíveis de se obter por meio de análises estáticas.

Apesar dos avanços metodológicos e empíricos, a literatura ainda apresenta limitações significativas. Primeiro, há fragmentação conceitual e metodológica, com estudos adotando definições heterogêneas de efeitos rebote e métodos incomparáveis de quantificação (Brockway et al., 2021). Segundo, existe escassez de estudos aplicados ao setor industrial brasileiro, limitando a compreensão do fenômeno no contexto nacional. Terceiro, há distância entre a sofisticação conceitual dos estudos acadêmicos e a aplicabilidade prática para gestores públicos e industriais, particularmente na construção de cenários prospectivos que informem políticas de longo prazo.

Inserida nesse contexto, a presente dissertação tem por objetivo desenvolver e validar empiricamente um modelo integrado baseado na dinâmica de sistemas (Forrester, 1958; 1961) e prospectiva estratégica (Godet, 2000) para caracterizar e quantificar os efeitos rebote decorrentes da melhoria da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050. A escolha do setor de motores elétricos industriais justifica-se pela sua relevância estratégica, dado que tais equipamentos respondem por parcela significativa do consumo elétrico da indústria nacional (EPE, 2024b; Fortes et al., 2020).

O modelo proposto busca responder aos desafios metodológicos identificados na literatura – entre eles, a fragmentação conceitual, a dificuldade de quantificação dos efeitos rebote e a necessidade de projeções de longo prazo. Ao mesclar técnicas de modelagem sistêmica, que captam interações dinâmicas e efeitos de retroalimentação, com métodos de prospecção de cenários, capazes de explorar futuros alternativos sob diferentes combinações de políticas e condições macroeconômicas, esta pesquisa pretende fornecer subsídios inéditos para formuladores de políticas públicas, reguladores e gestores na indústria.

Espera-se, com isso, que as estratégias de eficiência energética na indústria brasileira possam ser orientadas por resultados líquidos e projeções realistas, evitando a superestimação dos benefícios e permitindo uma avaliação mais crítica de suas consequências. Ao alinhar os potenciais ganhos de eficiência energética aos objetivos nacionais de competitividade, neutralidade de carbono e sustentabilidade

do setor produtivo, esta dissertação contribui para a formulação de políticas públicas mais eficazes e para a consolidação de um referencial metodológico aplicável a outros segmentos da economia.

Além disso, a análise da eficiência energética em relação ao consumo neste trabalho parte da premissa de que o cenário operacional após a implementação das medidas permanece equivalente ao anterior, ou seja, não há alteração significativa na demanda produtiva, no regime de operação ou nas condições de carga dos equipamentos. Essa definição é essencial para garantir que os ganhos observados sejam atribuídos exclusivamente às melhorias de eficiência e não a variações no perfil de utilização. Ao manter constante o contexto operacional, torna-se possível avaliar de forma isolada o impacto das estratégias de conservação energética, assegurando comparabilidade entre os indicadores antes e depois da intervenção.

### 1.1.

#### **Definição do problema de pesquisa**

A crescente transição do setor industrial brasileiro rumo a patamares mais elevados de eficiência energética – impulsionada por pressões econômicas, ambientais e regulatórias – coloca em evidência tanto as potencialidades quanto as ambiguidades desse processo. De um lado, os motores elétricos eficientes despontam como uma solução central para a competitividade e sustentabilidade do parque fabril nacional, promovendo reduções substanciais nos custos operacionais e nas emissões de gases de efeito estufa. Por outro lado, o risco dos efeitos rebote, já identificados em estudos internacionais e nacionais recentes, desafia as expectativas de uma relação direta entre eficiência e redução do consumo agregado, demandando análises mais refinadas e modelos integrativos para projeção de cenários energéticos realistas.

A literatura internacional demonstra que os efeitos rebote podem variar de 10 % a 100 %, dependendo da metodologia utilizada, setor analisado e contexto nacional (Brockway et al., 2021). Estudos empíricos mostram que, em alguns casos, as melhorias de eficiência resultam em *backfire*, levando a um consumo final que supera níveis anteriores às intervenções (Broberg et al., 2015). Essa diversidade de resultados reflete não apenas diferenças reais entre contextos, mas também limitações metodológicas que dificultam comparações e sínteses.

No Brasil, embora estudos como os de Fortes et al. (2020) indiquem a presença de efeitos rebote no uso de motores de alto rendimento, ainda há carência de modelos

integrados capazes de projetar cenários prospectivos e orientar políticas de longo prazo. Publicações da EPE (2024b; 2025) sugerem que, apesar de melhorias em indicadores de intensidade energética, o consumo absoluto da indústria continua crescendo, evidenciando possíveis efeitos compensatórios que precisam ser melhor compreendidos.

Considerando a problemática da estimativa de efeitos rebote decorrentes da melhoria da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil, estabeleceram-se as seguintes questões de pesquisa:

- Como caracterizar e estimar os efeitos rebote resultantes da implementação de melhorias na eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil em um horizonte temporal até 2050?;
- Em que medida a integração metodológica entre teoria da dinâmica de sistemas e prospecção estratégica amplia a capacidade analítica para a caracterização e estimativa dos efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais?;
- Quais estratégias de mitigação dos efeitos rebote identificados devem ser incorporadas ao arcabouço de políticas públicas brasileiras para otimizar os benefícios líquidos da eficiência energética no contexto industrial nacional?.

## 1.2.

### **Objetivos: geral e específicos**

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver e validar empiricamente um modelo baseado na abordagem de dinâmica de sistemas integrada à prospectiva estratégica para caracterizar e quantificar efeitos rebote resultantes de melhorias na eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050. Para alcance desse objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as contribuições dos principais marcos teórico, normativo e empírico sobre análise de efeitos rebote decorrentes da melhoria de eficiência energética nos diversos setores da economia;
- Analisar criticamente abordagens metodológicas alinhadas ao propósito da pesquisa, visando justificar a escolha da integração entre teoria da dinâmica de sistemas aplicada à estimativa dos efeitos rebote diretos (*forecasting*) e construção de cenários prospectivos (*foresight*);
- Estruturar um modelo baseado na teoria da dinâmica de sistemas e integrado à prospectiva estratégica para caracterizar e quantificar efeitos rebote

resultantes de melhorias na eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050;

- Desenvolver cenários prospectivos alternativos para examinar possíveis trajetórias e impactos dos efeitos rebote decorrentes do aumento de eficiência energética de motores elétricos industriais entre 2025 e 2050;
- Validar o modelo proposto por meio de simulações com emprego do *software* VenSim®. em cenários prospectivos distintos, quantificando os potenciais ganhos líquidos e os riscos associados aos efeitos rebote em cada cenário;
- Propor recomendações para políticas públicas, instrumentos regulatórios e estratégias empresariais voltadas à maximização dos benefícios de eficiência energética nos motores industriais, com ênfase na mitigação dos efeitos rebote identificados e adesão às melhores práticas internacionais.

### 1.3.

#### Metodologia

Segundo a classificação de Vergara (2002; 2015), a abordagem adotada nesta dissertação é descrita quanto aos fins como aplicada, descritiva, explicativa e metodológica.

Quanto aos meios de investigação, a metodologia adotada nesta pesquisa foi desenvolvida em etapas complementares que integram abordagens qualitativas e quantitativas, assegurando tanto o rigor científico quanto a aplicabilidade prática dos resultados, a saber: (i) revisão crítica da literatura sobre o tema central da pesquisa (Capítulo 2); (ii) modelagem de cenários prospectivos (Godet, 2000) integrada à teoria de dinâmica de sistemas (Forrester, 1958; 1961; Sterman, 2000) (Capítulo 3); e (iii) validação do modelo conceitual no setor de motores elétricos industriais no contexto brasileiro, considerando o horizonte temporal de 2050 (Capítulo 4).

A Figura 1.1 apresenta a sequência da pesquisa em suas três grandes fases: (i) exploratória e descritiva; (ii) pesquisa aplicada; (iii) conclusivo-propositiva. Na sequência, descrevem-se as três fases da pesquisa, representadas na Figura 1.1.

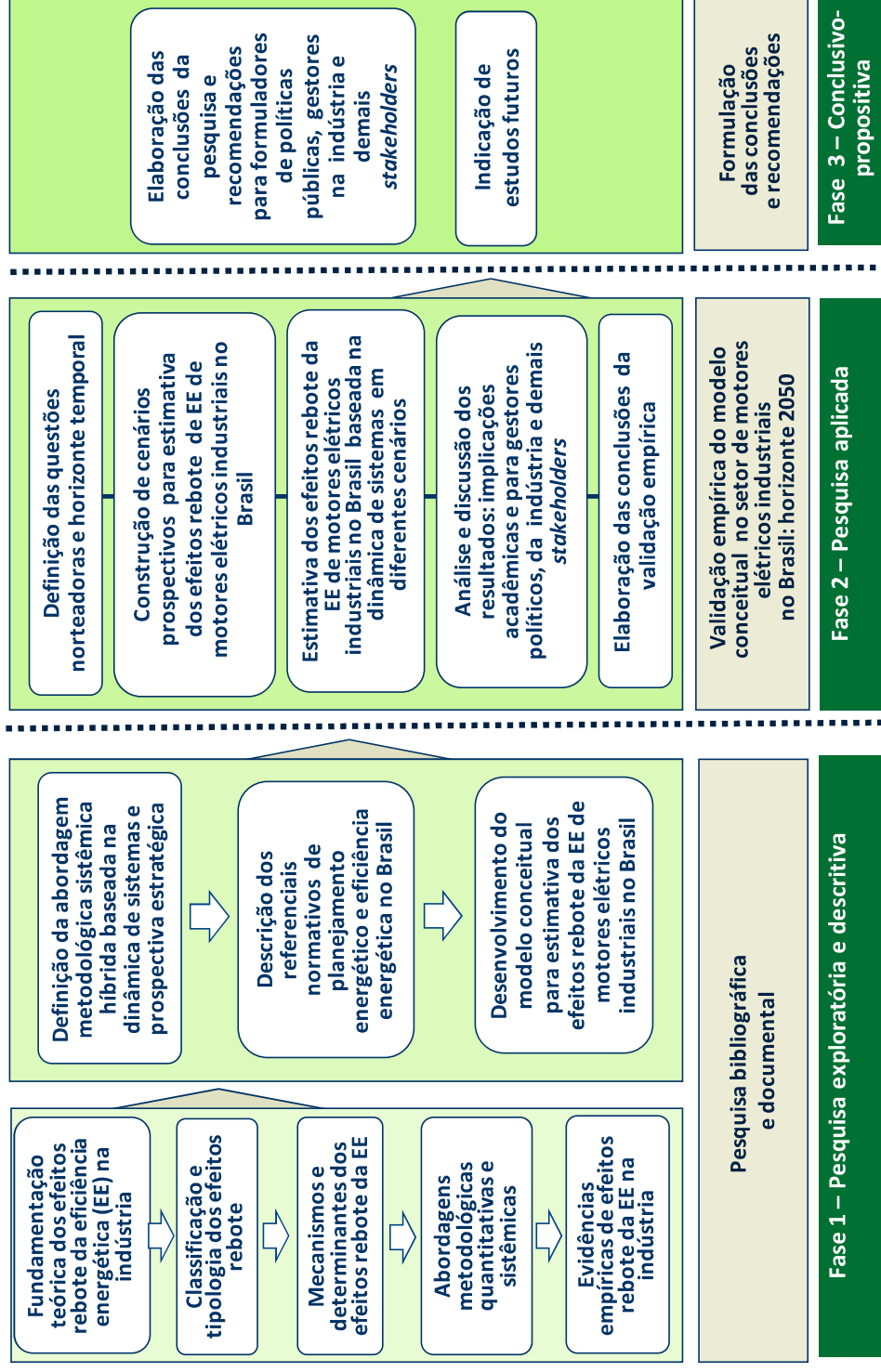


Figura 1.1 – Desenho da pesquisa, seus componentes e métodos

### 1.3.1.

#### Fase exploratória e descritiva

Esta etapa teve início com uma pesquisa bibliográfica voltada à estimativa dos efeitos rebote associados à eficiência energética no setor industrial. Para tanto, foram conduzidas buscas sistemáticas nas principais bases de dados de produção científica internacional até 2025 — Scopus e Web of Science — empregando-se combinações das palavras-chave “*energy efficiency*”, “*rebound effect*”, “*industry*” OR “*industrial sector*”, “*electric motors*”, “*system dynamics*”, “*strategic prospective* OR *prospective scenarios*” e “*Brazil*” articuladas por operadores booleanos (Apêndice A1). Os resultados obtidos foram posteriormente complementados por consultas ao Google Scholar e à base SciELO, com o objetivo de identificar estudos anteriores desenvolvidos no contexto brasileiro, assegurando assim uma cobertura abrangente da literatura relevante para o tema.

Na etapa seguinte, a revisão bibliográfica foi aprofundada por meio da aplicação de técnicas de *backward* e *forward searches*, a fim de ampliar a identificação de estudos relevantes. A estratégia de backward search consistiu na análise das referências utilizadas nos artigos previamente selecionados, permitindo resgatar pesquisas anteriores que serviram de base teórica e metodológica para os trabalhos de interesse. Já a *forward search* correspondeu ao rastreamento de publicações mais recentes que citaram esses mesmos artigos (*citation tracking*), o que possibilitou acompanhar a evolução do debate científico e identificar avanços conceituais e metodológicos subsequentes (Webster e Watson, 2002; Levy e Ellis, 2006).

Além da revisão bibliográfica com foco em artigos científicos, foi realizado também o mapeamento de publicações da chamada literatura cinza (*grey literature*), contemplando, por exemplo, documentos do Ministério de Minas e Energia, da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e da Confederação Nacional da Indústria (CNI).

Dessa forma, procedeu-se a uma análise abrangente do estado-da-arte em eficiência energética industrial e efeitos rebote, contemplando desde os fundamentos teóricos inaugurados por Jevons (1866) até as contribuições mais recentes de autores como Brockway et al. (2021) e Guzzo et al. (2024). Sob uma perspectiva metodológica rigorosa, elaborou-se uma síntese crítica das evidências empíricas

disponíveis em estudos dedicados à estimativa dos efeitos rebote da eficiência energética em diferentes subsetores industriais e contextos nacionais, tanto em países desenvolvidos quanto em economias emergentes (Quadro 2.1).

### **1.3.2.**

#### **Fase de pesquisa aplicada**

Esta fase iniciou com a análise comparativa de abordagens metodológicas sistêmicas, focalizando-se a teoria da dinâmica de sistemas (Forrester (1958; 1961) para caracterizar e quantificar efeitos rebote resultantes de melhorias na eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050. Esta análise considerou as limitações identificadas na literatura, como fragmentação conceitual, dificuldades de mensuração comparável e necessidade de integração entre escalas de análise e visão prospectiva (Greening et al., 2000; Sonnberger e Gross, 2018);

Assim, optou-se por incluir a construção de cenários prospectivos (Godet, 2000) na fase de modelagem de forma integrada à aplicação da teoria da dinâmica de sistemas ao contexto da presente pesquisa.

O desenvolvimento do modelo integrado compreendeu a construção de quatro cenários prospectivos com uso de ferramentas como análise estrutural das variáveis-chave do sistema e análise morfológica (Zwicky, 1969) para concepção propriamente dita dos cenários. Em seguida, modelaram-se as interações sistêmicas e *feedbacks* entre as principais variáveis-chave do sistema em cada cenário, com dados e projeções oficiais (EPE, 2024b e outras referências) e emprego do *software* VenSim®. O modelo foi ajustado, validado com dados históricos e posteriormente utilizado para simular e estimar os efeitos rebote e energia conservada em cada cenário prospectivo com diferentes graus de efetividade de políticas públicas.

### **1.3.3.**

#### **Fase conclusivo-propositiva**

Na terceira fase, foram elaboradas as conclusões em relação a cada um dos objetivos enunciados na seção 1.2, enfatizando-se os benefícios desta pesquisa para gestores públicos e da indústria. Foram propostas estratégias de mitigação – sejam elas tecnológicas, regulatórias ou setoriais -- validadas à luz dos resultados das simulações e das evidências da literatura recente sobre o tema. Essas estratégias consideraram as tendências emergentes identificadas na literatura, como a necessidade de políticas integradas, instrumentos de precificação de carbono e

abordagens interdisciplinares (Freire-González, 2021; Du et al., 2023). Recomendações e propostas de estudos futuros, como desdobramentos naturais da presente pesquisa, também foram formuladas nesta fase.

#### **1.4.**

#### **Estrutura da dissertação**

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, como descrito a seguir.

O Capítulo 1 configura a introdução, apresentando a contextualização do tema, justificativa científico-tecnológica, definição do problema, formulação das questões de pesquisa e enunciação dos objetivos gerais e específicos, assim como a descrição sintética da metodologia e da estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresenta inicialmente os conceitos centrais de eficiência energética, teoria e evidências empíricas do efeito rebote decorrentes das medidas de eficiência energética em diversos setores, com ênfase especial na indústria. Este capítulo aborda a fundamentação teórica do fenômeno, desde o Paradoxo de Jevons até as contribuições contemporâneas, as tipologias de efeitos rebote (diretos, indiretos, macroeconômicos e comportamentais), os mecanismos e determinantes de sua formação, e as evidências empíricas internacionais e nacionais. Na sequência, discute e compara as metodologias de modelagem dinâmica de sistemas e de construção de cenários prospectivos para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais, destacando suas vantagens, limitações e potencial de integração.

No Capítulo 3, propõe-se um modelo conceitual para estimar os efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais em diferentes cenários prospectivos no Brasil até o horizonte temporal de 2050. Este modelo baseia-se em uma abordagem metodológica inovadora de natureza sistêmica e híbrida, fundamentada na articulação entre a dinâmica de sistemas (Forrester, 1958; 1961) e a prospectiva estratégica (Godet, 2000), respondendo às lacunas de fragmentação conceitual e da necessidade de abordagens sistêmicas híbridas identificadas na revisão crítica da literatura apresentada no capítulo anterior.

No Capítulo 4, apresentam-se os resultados da validação empírica do modelo conceitual proposto no capítulo anterior. Inicialmente, constroem-se quatro cenários prospectivos distintos para examinar possíveis trajetórias e impactos dos efeitos rebote decorrentes do aumento de eficiência energética de motores elétricos

industriais no Brasil até 2050. Cada cenário explora, de forma integrada, como diferentes combinações de políticas públicas, difusão de inovações tecnológicas e condicionantes socioeconômicos e ambientais podem moldar o futuro da eficiência energética de motores elétricos industriais no país, considerando suas potenciais implicações em termos de efeitos rebote. Na sequência, quantificam-se os efeitos rebote associados às melhorias de eficiência energética de motores elétricos industriais em cada cenário prospectivo, empregando-se a teoria de dinâmica de sistemas com suporte do software VenSim®.

O Capítulo 5 expõe as conclusões e recomendações derivadas da pesquisa, abordando implicações para políticas públicas e atores do setor industrial, além de indicações para pesquisas futuras que explorem mecanismos adicionais de mitigação ou aspectos específicos negligenciados pelo modelo. Este Capítulo também discutirá as limitações do estudo e as tendências emergentes no campo de pesquisa sobre efeitos rebote.

A dissertação busca contribuir para uma compreensão abrangente, crítica e prospectiva dos desafios da eficiência energética industrial e dos efeitos rebote em um cenário de transição rumo a um setor produtivo mais competitivo, sustentável e alinhado às exigências do século XXI.

## 2

### **Referencial teórico sobre estimativa de efeitos rebote da eficiência energética na indústria**

Este capítulo apresenta uma revisão crítica da literatura sobre efeitos rebote da eficiência energética na indústria, abordando desde os fundamentos teóricos até as evidências empíricas e estratégias de mitigação. Inicialmente, apresenta-se a fundamentação teórica do fenômeno, explorando sua evolução conceitual a partir do Paradoxo de Jevons até as contribuições contemporâneas. Posteriormente, examinam-se a classificação e tipologias dos efeitos rebote (diretos, indiretos, macroeconômicos e comportamentais), seguida pela análise dos mecanismos e determinantes econômicos, tecnológicos, comportamentais e institucionais que os originam. Na sequência, apresentam-se as principais abordagens metodológicas utilizadas na quantificação desses efeitos, desde modelos econométricos até dinâmica de sistemas. As evidências empíricas internacionais e nacionais são sistematizadas, com destaque para o setor industrial, visando identificar as lacunas na literatura a serem preenchidas pela presente pesquisa. Por fim, discutem-se as medidas de mitigação propostas na literatura, incluindo instrumentos regulatórios, fiscais, comportamentais e tecnológicos.

#### **2.1.**

##### **Fundamentação teórica do efeito rebote da eficiência energética**

A literatura contemporânea sobre eficiência energética, ao incorporar a noção de efeito rebote, busca explicar os limites das melhorias tecnológicas quando estas são analisadas isoladamente, sem a devida consideração às reações econômicas e comportamentais dos agentes. O ponto de partida desse debate encontra-se, como mencionado, na obra de Jevons (1866), que formulou o paradoxo segundo o qual o progresso técnico não leva necessariamente à redução do consumo, mas pode, ao contrário, estimular o uso intensificado de recursos. Esse raciocínio abriu caminho para a construção de uma agenda de pesquisa que, ao longo do século XX e início do XXI, foi sendo enriquecida por modelos microeconômicos, análises de equilíbrio geral e contribuições das ciências sociais aplicadas ao consumo

energético.

Greening et al. (2000) foram pioneiros em propor uma sistematização abrangente do conceito, argumentando que o efeito rebote pode ser observado em múltiplas escalas e não deve ser reduzido a uma simples resposta de demanda. Segundo esses autores, a introdução de tecnologias mais eficientes desencadeia uma série de ajustes que vão desde o aumento direto do uso de equipamentos até transformações mais amplas nos padrões de produção e consumo. Essa perspectiva foi reforçada por Saunders (2000), que demonstrou, a partir de modelos de equilíbrio geral, como ganhos de eficiência podem induzir crescimento econômico e, em determinadas circunstâncias, neutralizar totalmente os benefícios ambientais esperados.

O conceito evoluiu para um quadro multidimensional. Em primeiro lugar, observa-se a dimensão microeconômica, que se expressa em respostas imediatas dos consumidores à redução do custo marginal de serviços energéticos. Em segundo, destaca-se a dimensão mesoeconômica, associada a mudanças setoriais e intersetoriais nos padrões de consumo de energia. Finalmente, a dimensão macroeconômica evidencia como ganhos de eficiência se propagam na economia como um todo, afetando preços relativos, competitividade e taxas de crescimento (Brockway et al., 2021). Esse enquadramento fornece uma visão integrada que permite compreender tanto as reações diretas quanto os efeitos difusos e agregados.

Do ponto de vista da economia ambiental, a noção de efeito rebote desafia a crença de que a eficiência tecnológica é um caminho linear e seguro para a sustentabilidade. Gillingham et al. (2015) sustentam que as respostas comportamentais e de mercado frequentemente reduzem a eficácia de programas de eficiência, sugerindo que tais políticas devem ser acompanhadas de instrumentos complementares, como precificação de carbono, regulação e campanhas de informação. A conclusão é que, embora a eficiência seja um elemento necessário da transição energética, ela não é suficiente se considerada isoladamente.

Estudos recentes ampliaram essa discussão ao enquadrar o efeito rebote no contexto mais amplo da sustentabilidade. Para Özsoy (2024), a análise não pode se restringir a efeitos quantitativos sobre o consumo energético, devendo contemplar também as implicações qualitativas sobre padrões de produção e consumo, bem como as repercussões socioambientais. Essa visão é convergente com a de Sonnberger e Gross (2018), que introduziram a perspectiva das práticas sociais,

destacando que a maneira como os indivíduos interpretam e incorporam tecnologias eficientes em seu cotidiano pode reforçar ou atenuar os efeitos de compensação.

Outra contribuição importante vem dos estudos de Freire-González (2021), que propôs a necessidade de governança do chamado Paradoxo de Jevons. Segundo o autor, o efeito rebote deve ser tratado não apenas como um fenômeno econômico inevitável, mas como um desafio de política pública, cuja mitigação exige instrumentos regulatórios e sistêmicos. Essa abordagem destaca a importância de integrar políticas de eficiência energética a estratégias mais amplas de transição, reconhecendo que, em contextos de crescimento econômico acelerado, o risco de neutralização dos ganhos ambientais é ainda maior.

A análise histórica do conceito evidencia sua evolução de um argumento essencialmente qualitativo, formulado por Jevons, para uma categoria analítica robusta, sustentada por modelos formais e evidências empíricas. No entanto, o desafio permanece: estimar a magnitude do efeito rebote em diferentes contextos e setores.

Em uma revisão abrangente, Brockway et al. (2021) identificaram que os estudos empíricos reportam ampla variação, com valores de efeito rebote que podem oscilar de 10 % a 100 %, dependendo da metodologia utilizada e do setor analisado. Essa diversidade metodológica reforça a necessidade de um referencial teórico sólido que permita interpretar os resultados de forma comparável.

No setor industrial, a relevância do efeito rebote é particularmente notável. Broberg et al. (2015) demonstraram que, na indústria sueca, a redução do custo energético decorrente de ganhos de eficiência induziu expansão da produção em vários segmentos, neutralizando parte significativa das economias esperadas. De forma semelhante, Zimmermann et al. (2021; 2022), ao analisarem o caso suíço, mostraram que mesmo em países com políticas ambientais avançadas o efeito rebote permanece um desafio para a efetividade da eficiência energética em termos de redução absoluta de emissões.

Essa constatação ganha relevância quando se considera o caso brasileiro. A indústria nacional, altamente dependente de energia elétrica e com grande heterogeneidade tecnológica, apresenta terreno fértil para manifestações de efeito rebote. Relatórios da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024b; 2025) evidenciam que, embora os indicadores de intensidade energética tenham melhorado, o consumo agregado da indústria mantém trajetória ascendente, o que

sugere a presença de mecanismos compensatórios. Estudos nacionais reforçam esse diagnóstico: Fortes et al. (2020) analisaram o impacto econômico do uso de motores de alto rendimento e observaram que, embora tragam ganhos de competitividade e redução de custos, esses equipamentos podem também estimular maior utilização e aumento de produção, ampliando a demanda energética total.

Outro ponto relevante na fundamentação teórica é a discussão sobre as elasticidades de demanda. A literatura aponta que o grau de resposta dos consumidores à queda do custo dos serviços energéticos é determinante para a magnitude do efeito rebote. Quando a elasticidade-preço da demanda é elevada, pequenas reduções de custo tendem a gerar aumentos expressivos no consumo, intensificando o efeito (Saunders, 2000; Wang e Nie, 2018). Em contrapartida, em setores com demanda mais inelástica, o efeito rebote tende a ser menor. Essa relação reforça a importância de análises setoriais, uma vez que a heterogeneidade das estruturas de mercado implica diferentes padrões de resposta.

Nos últimos anos, abordagens sistêmicas e interdisciplinares ganharam espaço ao considerar que o efeito rebote não deve ser visto apenas como problema econômico, mas como fenômeno complexo de retroalimentação dinâmica. Ahmadi Achachlouei e Hilty (2014) aplicaram a modelagem baseada em dinâmica de sistemas para representar interações entre eficiência, custos, consumo e externalidades ambientais, demonstrando que políticas isoladas podem gerar resultados contraintuitivos ao longo do tempo. Guzzo et al. (2024) reforçam essa perspectiva ao argumentar que compreender a complexidade dinâmica dos efeitos rebote é crucial para transições sustentáveis.

Esse referencial teórico estabelece as bases para avançar na discussão sobre as diferentes tipologias de efeitos rebote, os mecanismos de sua formação e as metodologias utilizadas em sua quantificação, temas que serão explorados nas seções subsequentes.

## **2.2.**

### **Classificação e tipologia dos efeitos rebote**

A literatura especializada tem se dedicado a construir tipologias que permitam sistematizar suas formas de ocorrência e oferecer instrumentos analíticos para mensuração e mitigação. Desde as revisões pioneiras de Greening et al. (2000), passando pelas sistematizações de Sorrell (2007; 2009) e chegando às contribuições

mais recentes de Vivanco et al. (2018) e Lange et al. (2021), consolidou-se o entendimento de que os efeitos rebote podem ser classificados em quatro grandes tipos: diretos, indiretos, macroeconômicos e comportamentais.

A classificação dos efeitos rebote fornece um referencial indispensável para a análise crítica de políticas de eficiência energética. O reconhecimento de que o fenômeno assume múltiplas formas – diretas, indiretas, macroeconômicas e comportamentais – permite compreender a amplitude de suas implicações e orientar estratégias de mitigação adequadas a cada contexto.

No caso da indústria, os diferentes tipos de efeitos rebote tendem a se manifestar de forma simultânea, o que reforça a importância de abordagens híbridas e interdisciplinares. Como apontam Sorrell (2009), Vivanco et al. (2018) e Lange et al. (2021), os limites da eficiência energética não podem ser avaliados apenas em termos técnicos, mas devem considerar a interação entre economia, comportamento e instituições.

Essa tipologia, ao mesmo tempo que organiza o conhecimento acumulado sobre esse tema, também indica os desafios da quantificação desses efeitos, evidenciando-se as lacunas na literatura que serão abordadas na presente pesquisa.

### **2.2.1. Efeitos rebote diretos**

Os efeitos rebote diretos constituem a forma mais imediata e intuitiva do fenômeno. Eles ocorrem quando uma melhoria de eficiência em um serviço energético específico – por exemplo, motores elétricos industriais, sistemas de aquecimento ou veículos automotivos – reduz o custo marginal desse serviço, induzindo o aumento de sua demanda. Em outras palavras, quanto mais barato se torna operar um equipamento ou realizar determinada atividade energética, maior tende a ser sua utilização. Akbaba (1999), ao analisar a adoção de motores de alta eficiência, demonstrou que a redução do custo por quilowatt-hora efetivamente utilizado pode levar empresas a prolongar turnos de operação, intensificando o uso da energia elétrica.

Estudos empíricos estimam que os efeitos rebote diretos podem variar de 10 % a 30 % para combustíveis e serviços energéticos, dependendo do grau de elasticidade da demanda (Greening et al., 2000).

Berner et al. (2022) aprofundaram essa análise no nível micro, demonstrando

que, na indústria alemã, as empresas mais eficientes tendem a aumentar sua produção, aproveitando a redução de custos unitários, o que resulta em um efeito rebote mensurável na escala microeconômica.

No setor industrial brasileiro, essa forma de efeito rebote é particularmente relevante devido à difusão de equipamentos elétricos de alta potência e longa vida útil. Fortes et al. (2020) mostraram que a introdução de motores de alto rendimento contribui para ganhos expressivos de competitividade e redução de custos, mas pode igualmente estimular maior volume de produção e, conseqüentemente, maior consumo absoluto de energia elétrica.

### **2.2.2. Efeitos rebote indiretos**

Os efeitos rebote indiretos referem-se à realocação de recursos poupados em razão da eficiência para outros tipos de consumo que também demandam energia em sua cadeia produtiva. Nesse caso, a economia financeira obtida com a redução da conta de energia não é totalmente convertida em poupança, mas utilizada para aquisição de bens e serviços adicionais. Esses bens, por sua vez, implicam consumo energético e emissões de gases de efeito estufa em sua produção, transporte e uso.

Um exemplo ilustrativo é o caso de uma empresa do setor industrial que, ao economizar custos de energia por meio de processos mais eficientes, decide investir os recursos poupados em expansão da frota logística ou em tecnologias auxiliares de automação, ambas com elevada intensidade energética. Segundo Brockway et al. (2021), esse efeito pode ser tão significativo quanto o efeito rebote direto, dado que o consumo deslocado para outros setores dificilmente é neutro em termos energéticos.

Vivanco et al. (2014; 2015) reforçam esse ponto ao analisar inovações no setor de transportes. Os autores demonstram que a economia de combustível decorrente de veículos mais eficientes pode ser redirecionada para o consumo de outros bens e serviços, levando a uma *'rebound chain'* que se espalha pela economia. Essa perspectiva amplia a noção de efeito rebote ao incorporar o conceito de repercussões intersetoriais, indicando que os benefícios de eficiência devem ser avaliados em termos de ciclo de vida e não apenas no ponto de uso direto.

### **2.2.3. Efeitos rebote macroeconômicos**

Os efeitos rebote macroeconômicos são aqueles que se manifestam no agregado da economia, resultantes da soma de múltiplos efeitos diretos e indiretos e de ajustes nos preços relativos. Saunders (2000) foi um dos primeiros a demonstrar, em modelos de equilíbrio geral computável, que a eficiência energética reduz custos de produção, estimula a competitividade e induz crescimento econômico, o que, paradoxalmente, pode levar ao aumento absoluto do consumo energético.

Broberg et al. (2015), em estudo sobre a indústria sueca, verificaram que os efeitos de equilíbrio geral podem chegar a neutralizar integralmente os ganhos esperados de eficiência em determinados setores, configurando o chamado *backfire*. De maneira semelhante, Brockway et al. (2021), em revisão sistemática, identificaram evidências robustas de que os efeitos macroeconômicos tendem a ser mais pronunciados em economias emergentes e em subsetores intensivos em energia, justamente porque a redução de custos abre espaço para expansão de produção e de mercados.

No contexto brasileiro, a EPE (2024b; 2025) aponta que, embora a intensidade energética da economia venha diminuindo, o consumo total cresce em linha com a expansão do PIB industrial. Esse dado sugere que, em nível agregado, as melhorias de eficiência não têm sido suficientes para reduzir o consumo absoluto de energia, evidenciando a relevância do efeito rebote macroeconômico.

### **2.2.4. Efeitos rebote comportamentais**

A quarta categoria refere-se aos efeitos rebote comportamentais, associados a mudanças nos padrões de uso de energia em função de percepções subjetivas de economia ou sustentabilidade. Trata-se de um fenômeno em que consumidores ou empresas, ao perceberem que determinado equipamento é mais eficiente, sentem-se autorizados a utilizá-lo de forma mais intensiva. Essa resposta, descrita em algumas análises como moral *licensing*, mostra como a percepção social da eficiência pode induzir comportamentos compensatórios.

Sonnberger e Gross (2018) foram pioneiros em propor a análise do efeito rebote a partir da teoria das práticas sociais, destacando que a adoção de tecnologias eficientes se insere em contextos culturais e normativos que moldam o uso

cotidiano. Por exemplo, uma empresa que adota sistemas de iluminação de LED pode optar por manter mais ambientes iluminados por mais tempo, reduzindo os ganhos líquidos de eficiência.

Esse tipo de efeito rebote também se manifesta em decisões de investimento. Zimmermann et al. (2021; 2022) observaram que empresas suíças, ao incorporarem tecnologias de alta eficiência, passaram a expandir horários de operação e a diversificar linhas de produção, legitimando maior consumo sob a justificativa de ganhos ambientais ou de custos.

#### **2.2.5. Tipologias ampliadas e classificações híbridas**

Nos últimos anos, pesquisadores têm buscado integrar essas quatro categorias tradicionais em esquemas analíticos mais amplos. Lange et al. (2021), por exemplo, propuseram uma tipologia multinível que relaciona mecanismos micro, meso e macroeconômicos em um quadro articulado. O objetivo é superar classificações estanques e reconhecer que, na prática, os diferentes tipos de efeitos rebote frequentemente se sobrepõem e interagem.

Metic e Pigosso (2022a; 2022b), ao estudarem os efeitos do modelo de economia circular, identificaram que o reaproveitamento de materiais pode gerar efeitos rebote simultâneos em múltiplas escalas: (i) aumento direto no uso de tecnologias de reciclagem; e (ii) realocação de recursos para novos consumos e impactos macroeconômicos na expansão de cadeias produtivas. Essa abordagem evidencia que a classificação dos efeitos rebote deve ser vista como ferramenta analítica, e não como compartimentação rígida.

Guzzo et al. (2024) também argumentam que é necessário adotar uma visão sistêmica dos efeitos rebote, modelando os ciclos de retroalimentação entre os diferentes mecanismos. Para os autores, compreender a complexidade dinâmica desses efeitos é essencial para desenhar políticas eficazes, uma vez que medidas que neutralizam efeitos rebote diretos podem inadvertidamente acentuar efeitos rebote indiretos ou macroeconômicos.

### **2.3. Mecanismos e determinantes dos efeitos rebote da eficiência energética**

A análise dos fundamentos teóricos do efeito rebote demanda o

aprofundamento nos mecanismos econômicos, tecnológicos, comportamentais e institucionais que dão origem a esse fenômeno. Diferentemente da simples constatação empírica de que a eficiência energética não se traduz integralmente em economia de energia, trata-se aqui de compreender as causas estruturais e dinâmicas que explicam por que e como os agentes respondem às mudanças induzidas pela eficiência. Essa abordagem é crucial, pois fornece os elementos para a construção de modelos analíticos consistentes e para o desenho de políticas públicas capazes de mitigar ou redirecionar os efeitos compensatórios.

### **2.3.1. Mecanismos de formação dos efeitos rebote**

A literatura identifica múltiplos mecanismos pelos quais os efeitos rebote se manifestam. Em nível microeconômico, o mecanismo mais evidente é a redução do custo marginal do serviço energético. Quando um motor elétrico mais eficiente substitui outro de menor rendimento, a quantidade de energia necessária para realizar uma mesma tarefa diminui, reduzindo o custo unitário associado. Esse barateamento incentiva o uso mais intensivo do equipamento, seja por aumento do tempo de operação, seja por incorporação em novas atividades produtivas (Akbaba, 1999; Greening et al., 2000).

Em nível setorial e macroeconômico, os mecanismos tornam-se mais complexos. Saunders (2000) demonstrou que, ao reduzir custos de produção, a eficiência energética aumenta a competitividade das empresas e pode induzir a expansão da produção. Esse mecanismo opera como uma elasticidade cruzada, em que a queda no custo da energia reduz preços relativos e estimula a demanda agregada. Broberg et al. (2015) reforçaram esse argumento ao mostrar que, em indústrias intensivas em energia, ganhos de eficiência frequentemente resultam em crescimento setorial que anula parte ou até mesmo a totalidade das economias energéticas.

Outro mecanismo relevante é o da realocação de renda. A economia financeira obtida pela redução dos gastos com energia pode ser redirecionada para o consumo de outros bens e serviços, os quais, em sua cadeia de produção e uso, também demandam energia. Esse é o núcleo do efeito rebote indireto, como discutido por Vivanco et al. (2014; 2015). Por exemplo, recursos economizados com iluminação eficiente podem ser aplicados em climatização, aquisição de

equipamentos ou viagens corporativas, todos intensivos em energia.

No âmbito comportamental, os mecanismos estão ligados à percepção subjetiva de economia e sustentabilidade. Sonnberger e Gross (2018) destacam que, quando consumidores ou empresas acreditam estar fazendo “a coisa certa” ao adotar tecnologias eficientes, tendem a relaxar restrições anteriores de uso, fenômeno conhecido como *moral licensing*. Assim, a lógica não é apenas econômica, mas também cultural e psicológica, inserindo a análise do efeito rebote no campo da sociologia do consumo.

Em termos dinâmicos, Guzzo et al. (2024) argumentam que os mecanismos do efeito rebote devem ser compreendidos como parte de ciclos de retroalimentação complexos. Uma redução inicial de custos pode desencadear efeitos de segunda ordem, como expansão de mercados, mudanças tecnológicas adicionais e alterações nas expectativas dos consumidores. Essa visão sistêmica sugere que o efeito rebote não é um evento isolado, mas um processo contínuo que interage com outros fatores econômicos e institucionais.

### **2.3.2.**

#### **Determinantes econômicos dos efeitos rebote**

Os determinantes econômicos dos efeitos rebote estão fortemente associados às elasticidades-preço e elasticidades-renda da demanda por energia. Em setores onde a demanda é elástica, mesmo pequenas reduções de custo podem levar a aumentos significativos no consumo, intensificando o efeito rebote (Wang e Nie, 2018). Já em setores de demanda inelástica, como alguns subsectores industriais pesados, os ganhos de eficiência tendem a resultar em reduções líquidas mais perceptíveis.

Outro determinante econômico é a estrutura de mercado. Em ambientes altamente competitivos, as empresas tendem a repassar as reduções de custo para os preços finais, estimulando a demanda e ampliando o efeito macroeconômico (Brockway et al., 2021). Em contraste, mercados regulados ou monopólios naturais, como ocorre em certos segmentos da energia elétrica, podem restringir esse repasse e, portanto, reduzir a magnitude do efeito rebote.

As condições macroeconômicas também são determinantes relevantes. Em períodos de crescimento econômico acelerado, a demanda por energia tende a expandir independentemente da eficiência, o que aumenta a probabilidade de

*backfire*. Por outro lado, em períodos de estagnação, a eficiência pode resultar em reduções líquidas de consumo mais visíveis (Saunders, 2000; Zimmermann et al., 2021; 2022).

### **2.3.3.**

#### **Determinantes tecnológicos dos efeitos rebote**

Do ponto de vista tecnológico, os determinantes dos efeitos rebote incluem a natureza das inovações e seu grau de difusão. Tecnologias de rápida disseminação e baixo custo de adoção tendem a gerar efeitos rebote mais intensos, justamente porque se tornam amplamente utilizadas em curto espaço de tempo. No setor industrial, os motores elétricos de alto rendimento exemplificam esse padrão: seu custo relativamente acessível e os ganhos imediatos de eficiência incentivam substituições em larga escala, com potencial de amplificação da produção (Fortes et al., 2020).

Outro fator é a integração tecnológica. Inovações que reduzem custos em um elo da cadeia produtiva podem estimular inovações complementares em outros elos, ampliando o consumo agregado de energia. Li e Lin (2017) mostraram que, na China, ganhos de eficiência em subsectores pesados induziram mudanças estruturais em cadeias industriais inteiras, elevando a demanda energética agregada.

Além disso, há que se considerar o paradoxo da eficiência técnica *versus* eficiência econômica. Uma tecnologia pode ser tecnicamente eficiente, reduzindo a quantidade de energia necessária por unidade de produto, mas ambientalmente ineficiente se estimular expansão da escala produtiva e aumentar o consumo agregado (Greening et al., 2000).

### **2.3.4.**

#### **Determinantes comportamentais dos efeitos rebote**

Os determinantes comportamentais dos efeitos rebote remetem à psicologia econômica e à teoria das práticas sociais. Sonnberger e Gross (2018) enfatizam que os consumidores não respondem apenas a sinais de preço, mas também a normas sociais, hábitos e percepções de legitimidade. Assim, a introdução de tecnologias eficientes pode alterar os significados atribuídos ao consumo de energia.

Zimmermann et al. (2021; 2022) demonstraram que empresas que investem em eficiência frequentemente ampliam o tempo de operação de suas plantas, justificando o aumento do consumo pelo argumento de que os processos agora são

“mais sustentáveis”. Esse comportamento revela que, além das variáveis econômicas, é necessário considerar os contextos organizacionais e culturais nos quais a eficiência é incorporada.

Motavasseli (2024) acrescenta outro elemento, i.e., a heterogeneidade socioeconômica. Diferentes grupos de renda respondem de formas distintas aos ganhos de eficiência. Enquanto grupos de alta renda podem ampliar o consumo de serviços energéticos em função do menor custo marginal, grupos de baixa renda podem direcionar a economia para atender necessidades básicas, resultando em padrões de efeito rebote diferenciados.

### **2.3.5.**

#### **Determinantes institucionais e regulatórios dos efeitos rebote**

Finalmente, os determinantes institucionais e regulatórios exercem papel central na magnitude do efeito rebote. Freire-González (2021) sustenta que a governança do Paradoxo de Jevons depende da combinação entre políticas de eficiência e instrumentos regulatórios capazes de internalizar externalidades. Entre esses instrumentos, destacam-se a precificação de carbono, padrões mínimos de desempenho energético e programas de informação.

Du et al. (2023) reforçam esse ponto ao demonstrar que regulações ambientais rígidas podem mitigar substancialmente os efeitos de compensação, ao limitar a expansão da demanda induzida por ganhos de eficiência. Da mesma forma, Kern et al. (2022) argumentam que a aceitação social das políticas de eficiência depende da construção de mixes regulatórios eficazes, capazes de equilibrar incentivos e restrições.

No Brasil, o Plano Nacional de Eficiência Energética (Brasil/MME, 2011) e o Plano Nacional de Energia 2050 (Brasil/MME/EPE, 2020) reconhecem a importância de integrar a eficiência a políticas de longo prazo, mas ainda carecem de mecanismos específicos de mitigação do efeito rebote. Relatórios recentes da EPE (2024b; 2025) mostram que, embora haja avanços em indicadores de intensidade energética, o crescimento absoluto da demanda continua desafiando os objetivos de sustentabilidade.

### **2.3.6.**

#### **Visão teórica integrada dos efeitos rebote**

Os fundamentos discutidos evidenciam que os efeitos rebote resultam de

interações complexas entre múltiplos determinantes. A visão microeconômica, centrada em preços e elasticidades, é necessária, mas insuficiente. É preciso integrar a perspectiva tecnológica, que mostra como inovações podem induzir efeitos em cadeia; a perspectiva comportamental, que revela como práticas sociais moldam o uso da energia; e a perspectiva institucional, que destaca o papel das políticas públicas e das estruturas regulatórias.

Modelos híbridos têm buscado essa integração. Amjadi et al. (2022) propõem abordagens dinâmicas que combinam variáveis econômicas e ambientais, captando simultaneamente os efeitos diretos, indiretos e de equilíbrio geral. Guzzo et al. (2024) avançam nessa direção ao propor modelagens sistêmicas que representam feedbacks complexos entre economia, tecnologia e comportamento.

Essa integração é particularmente relevante para o setor industrial brasileiro, caracterizado por heterogeneidade tecnológica, competitividade internacional e crescente pressão regulatória. Nesse contexto, compreender os mecanismos e determinantes do efeito rebote é condição indispensável para que políticas de eficiência energética sejam efetivas, evitando a frustração de metas climáticas e de sustentabilidade.

## **2.4.**

### **Abordagens metodológicas: quantitativas e sistêmicas**

O avanço da literatura sobre quantificação e avaliação dos efeitos rebote da eficiência energética está intrinsecamente ligado ao desenvolvimento de metodologias capazes de estimar sua magnitude e interpretar suas múltiplas dimensões. Diferentes tradições acadêmicas – da economia neoclássica à dinâmica de sistemas e à análise de ciclo de vida – deram origem a abordagens complementares, cada uma com suas vantagens e limitações.

As abordagens metodológicas para estudo dos efeitos rebote da eficiência energética dividem-se entre análises quantitativas, centradas em elasticidades e modelos econométricos, e abordagens sistêmicas, baseadas em dinâmica de sistemas e avaliação de ciclo de vida (ACV). Ambas oferecem contribuições valiosas, mas apresentam limitações que exigem integração. O desafio central é capturar a complexidade do fenômeno sem perder rigor empírico. Nesse sentido, a convergência entre métodos quantitativos e sistêmicos emerge como uma das direções mais promissoras da pesquisa contemporânea.

### **2.4.1. Abordagens quantitativas**

As abordagens quantitativas procuram estimar empiricamente o efeito rebote a partir de dados de consumo de energia, preços e produção. A ideia central é que a relação entre eficiência e consumo não pode ser avaliada em termos puramente técnicos, devendo ser analisada em função das respostas econômicas observadas.

Modelos de elasticidade-preço e elasticidade-renda constituem a base dessa tradição. Eles partem do pressuposto de que melhorias na eficiência energética equivalem, em termos econômicos, a uma redução implícita no preço do serviço energético. Assim, quanto maior a elasticidade-preço da demanda, maior tende a ser a resposta em termos de aumento do consumo (Greening et al., 2000). Saunders (2000) formalizou esse raciocínio ao demonstrar que o efeito rebote pode ser entendido como uma consequência inevitável da teoria da demanda, sendo sua magnitude condicionada pelas elasticidades envolvidas.

Modelos econométricos de séries temporais têm sido amplamente empregados para medir efeitos rebote em setores específicos. Li e Lin (2017), por exemplo, utilizaram dados da indústria chinesa para comparar diferenças entre subsetores pesados e leves, identificando que os primeiros exibem efeitos rebote significativamente mais elevados, em função de sua maior elasticidade energética. Da mesma forma, estudos como os de Wang e Nie (2018) estimaram efeitos rebote a partir da análise conjunta de preços e choques energéticos, evidenciando que variações inesperadas nos preços da energia podem amplificar ou atenuar o efeito de eficiência.

Outro instrumento importante são os modelos de demanda de fatores com resposta assimétrica a preços, como o aplicado por Dahlqvist et al. (2021) em indústrias intensivas em energia. Esses modelos reconhecem que as empresas podem responder de maneira diferente a aumentos e reduções nos preços, o que afeta diretamente a estimativa da magnitude do efeito rebote.

Uma segunda linha metodológica quantitativa é a dos modelos de equilíbrio geral computável (CGE). Esses modelos procuram captar o impacto agregado da eficiência energética sobre toda a economia, considerando interações entre setores, preços relativos e renda. Broberg et al. (2015) aplicaram essa abordagem à economia sueca, demonstrando que os ganhos de eficiência em setores específicos podem se difundir e gerar efeitos macroeconômicos significativos. Huang et al.

(2023) realizaram uma revisão sistemática de estudos baseados em CGE, concluindo que, embora robustos em captar interações macroeconômicas, esses modelos frequentemente dependem de hipóteses restritivas sobre elasticidades e comportamento dos agentes.

No Brasil, metodologias quantitativas têm sido aplicadas em estudos setoriais pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024b; 2025), que desenvolve indicadores de intensidade energética ajustados para variações estruturais na economia. Embora não diretamente desenhados para medir efeitos rebote, esses indicadores fornecem evidências indiretas do fenômeno, ao mostrar que a melhoria da intensidade energética nem sempre se traduz em redução proporcional do consumo agregado.

Apesar de sua importância, as abordagens quantitativas enfrentam críticas. Primeiro, por dependerem fortemente da disponibilidade e qualidade dos dados, o que é particularmente desafiador em países emergentes. Segundo, porque muitas vezes assumem relações lineares entre variáveis, negligenciando dinâmicas não lineares e efeitos de retroalimentação. Finalmente, por não captarem adequadamente as dimensões comportamentais e institucionais do fenômeno, que escapam à lógica estritamente econômica (Gillingham et al., 2015; Sonnberger e Gross, 2018).

#### **2.4.2. Abordagens sistêmicas**

Diante das limitações das abordagens quantitativas tradicionais, pesquisadores passaram a adotar metodologias sistêmicas, capazes de representar a complexidade dinâmica dos mecanismos de efeitos rebote. Essas abordagens inspiram-se na teoria de sistemas e na modelagem dinâmica, permitindo explorar cenários de longo prazo e interações entre múltiplas variáveis.

A dinâmica de sistemas, proposta inicialmente por Forrester (1958; 1961), é uma das abordagens metodológicas mais utilizadas nessa linha. Ela permite construir modelos baseados em estoques, fluxos e retroalimentações, representando como mudanças em eficiência, custos, consumo e políticas interagem ao longo do tempo. Ahmadi Achachlouei e Hilty (2014) aplicaram a dinâmica de sistemas para modelar os efeitos rebote em contextos de tecnologias da informação e eficiência energética, evidenciando que políticas isoladas frequentemente geram

consequências não intencionais ao longo do ciclo de retroalimentação.

Guzzo et al. (2024) aprofundaram essa perspectiva ao propor uma visão sistêmica do efeito rebote em transições de sustentabilidade. Para os autores, compreender os efeitos rebote exige mapear os *loops de feedback* que conectam tecnologia, comportamento, economia e instituições. Por exemplo, a adoção de motores mais eficientes pode reduzir custos, estimular a produção, aumentar a renda disponível e, por fim, reforçar a demanda por energia em múltiplas etapas da cadeia.

Outra aplicação relevante é a integração entre dinâmica de sistemas e análise de cenários prospectivos. Amjadi et al. (2022) desenvolveram modelos dinâmicos que simulam trajetórias de eficiência industrial e seus impactos em emissões de carbono. Essa metodologia permite avaliar como diferentes combinações de políticas – como impostos sobre carbono, subsídios a tecnologias eficientes ou campanhas de conscientização – podem modificar a magnitude dos efeitos rebote ao longo de horizontes de décadas.

Além da dinâmica de sistemas, há contribuições da ACV. Vivanco et al. (2014) aplicaram a ACV para mensurar efeitos rebote ambientais decorrentes de inovações em transportes, demonstrando que mesmo tecnologias consideradas limpas podem gerar impactos adicionais quando se consideram efeitos indiretos e substituições em larga escala. Essa abordagem amplia o foco para além da energia, incluindo materiais, emissões e impactos ambientais associados.

Os métodos híbridos constituem uma tendência emergente que combina elementos das abordagens quantitativas e sistêmicas. Xu et al. (2023), por exemplo, utilizaram dados empíricos de consumo industrial na China para alimentar modelos de dinâmica de sistemas, produzindo estimativas mais realistas da evolução dos efeitos rebote em diferentes subsectores. Essa integração busca superar as limitações de cada tradição metodológica isoladamente, oferecendo resultados mais robustos para a formulação de políticas.

## 2.5.

### **Evidências empíricas de efeitos rebote da eficiência energética na indústria**

Os efeitos rebote, embora inicialmente formulados como hipóteses teóricas, têm sido amplamente estudados em contextos empíricos, especialmente no setor industrial. A indústria é um campo privilegiado de observação, porque combina intensidade energética elevada, pressões competitivas por eficiência e

heterogeneidade tecnológica. Nesse ambiente, os mecanismos de efeitos rebote – diretos, indiretos e macroeconômicos – manifestam-se de forma concreta, podendo neutralizar parte significativa dos ganhos esperados com a difusão de inovações tecnológicas e políticas de eficiência energética.

O Quadro 2.1 apresenta uma síntese das evidências empíricas apresentadas em estudos prévios sobre estimativa dos efeitos rebote da eficiência energética em distintos subsetores industriais e contextos nacionais, com ênfase nas abordagens metodológicas utilizadas, tanto em países desenvolvidos quanto em economias emergentes.

Esses estudos apontam magnitudes variáveis de efeitos rebote da eficiência energética na indústria, mas frequentemente elevadas, que chegam a anular grande parte dos benefícios esperados das intervenções. A heterogeneidade setorial e nacional reforça a necessidade de políticas adaptadas a cada realidade.

Quadro 2.1 – Evidências empíricas relativas à estimativa de efeitos rebote da eficiência energética na indústria

| Autor(es) (Ano)                           | Objetivos do estudo                                                                                       | Setor/País                                                                                                              | Abordagem metodológica                                                                                       | Efeitos rebote quantificados                                                        |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Ahmadi Achachlouei e Hilty (2014)         | Aplicar a dinâmica de sistemas para representar interações entre eficiência energética, custos e consumo. | Inicialmente em tecnologias da informação, mas com aplicações industriais indiretas (sem recorte exclusivo em um país). | Modelagem de estoques e fluxos ( <i>system dynamics</i> ) para quantificar efeitos rebote ao longo do tempo. | Efeitos de retroalimentação podem ampliar efeitos rebote em horizontes mais longos. |
| Broberg, Berg e Samakovlis (2015)         | Analisar efeitos de eficiência energética na indústria sueca e sua repercussão no consumo agregado.       | Indústria, Suécia                                                                                                       | Modelo de equilíbrio geral computável (CGE)                                                                  | Até 70 %, com risco de backfire em alguns setores                                   |
| Li e Lin (2017)                           | Comparar efeitos rebote em setores da indústria pesadas e leve na China.                                  | Indústria (setores pesados e leves), China                                                                              | Análise econométrica comparativa entre setores                                                               | Setores pesados: ~50–80 %; setores leves: ~20–30 %                                  |
| Li, Liu e Du (2019)                       | Investigar impacto de reformas de mercado sobre os efeitos rebote regionais na China.                     | Indústria, China                                                                                                        | Econometria aplicada às reformas de mercado regionais                                                        | Reformas ampliaram efeitos rebote regionais (~40–60 %)                              |
| Safarzadeh, Rasti-Barzoki e Hejazi (2020) | Avaliar eficácia de políticas de eficiência e seus efeitos rebote na indústria iraniana.                  | Indústria, Irã                                                                                                          | Modelagem econômica e análise de políticas                                                                   | Subsídios isolados geraram efeitos rebote (~50 %)                                   |
| Fortes, Sousa e Borba (2020)              | Investigar impacto econômico do uso de motores de alto rendimento na indústria brasileira.                | Indústria (motores de alto rendimento), Brasil                                                                          | Avaliação econômica e técnica de motores de alto rendimento.                                                 | Efeitos indiretos e macroeconômicos (~20–40 %).                                     |
| Lutz et al. (2021)                        | Estimar diferenças setoriais no efeito rebote dentro da indústria alemã.                                  | Indústria (química, metalúrgica, etc.), Alemanha                                                                        | Modelos econométricos setoriais                                                                              | Variações setoriais: altos em química e metalurgia; menores em setores leves        |
| Zimmermann et al. (2021; 2022)            | Avaliar resultados de programas industriais de eficiência energética na Suíça.                            | Indústria, Suíça                                                                                                        | Avaliação de programas de eficiência energética                                                              | Consumo absoluto elevado; efeito rebote implícito ~40–60 %                          |

Quadro 2.1 – Evidências empíricas relativas à estimativa de efeitos rebote da eficiência energética na indústria (cont.)

| <b>Autor(es) (Ano)</b>              | <b>Objetivos do estudo</b>                                                                                                                                                 | <b>Setor/País</b>                                                                                                                        | <b>Abordagem metodológica</b>                                                                                              | <b>Efeitos rebote quantificados</b>                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Berner, Lange e Silbersdorff (2022) | Avaliar efeitos rebote em nível micro (empresas) na indústria alemã.                                                                                                       | Indústria, Alemanha                                                                                                                      | Análise econométrica em nível micro (empresa)                                                                              | Efeitos rebote positivos observados em empresas mais eficientes (não quantificados em %)                                                                                                                                            |
| Jin e Yu (2022)                     | Examinar impacto das TICs em setores intensivos em energia na China.                                                                                                       | Indústria intensiva em energia, China                                                                                                    | Modelos econométricos setoriais aplicados à digitalização                                                                  | Efeitos rebote associados à digitalização (~30–50 %)                                                                                                                                                                                |
| Ahmann, Banning e Lutz (2022)       | Estudar efeitos rebote e políticas compensatórias na indústria alemã.                                                                                                      | Indústria, Alemanha                                                                                                                      | Estudos empíricos e modelagem econômica                                                                                    | Efeitos rebote significativos; necessidade de políticas compensatórias (sem % exato)                                                                                                                                                |
| Cansino, Ordóñez e Prieto (2022)    | Mensurar efeitos rebote derivados de melhorias de eficiência na indústria espanhola.                                                                                       | Indústria, Espanha                                                                                                                       | Decomposição e análise de consumo energético                                                                               | Efeito Rebote ~30–40 % na indústria espanhola                                                                                                                                                                                       |
| Amjadi, Lundgren e Zhou (2022)      | Aplicar modelos dinâmicos para quantificar impactos da eficiência industrial sobre consumo energético e emissões.                                                          | Indústria em escala internacional (com foco em dados europeus).                                                                          | Integração de dinâmica de sistemas com análise econômica dinâmica.                                                         | Evidenciou que efeitos rebote podem variar conforme políticas de precificação e contexto macroeconômico.                                                                                                                            |
| Guzzo et al. (2024)                 | Explicar a ocorrência dos efeitos rebote, descrevendo e modelando suas estruturas causais. Propor estruturas genéricas que evidenciam a dinâmica sistêmica desses efeitos. | Não há foco em um setor ou país específico; o estudo é de caráter transversal e abrangente, aplicável a diferentes setores e geografias. | Modelagem qualitativa em dinâmica de sistemas, utilizando diagramas de laços causais ( <i>Causal Loop Diagrams</i> – CLD). | Efeitos rebote organizam-se em duas estruturas: (1) loops de reforço que contrariam reduções rápidas de consumo; (2) reações de balanceamento que geram dinâmicas de escalada, podendo anular até 50 % dos benefícios sustentáveis. |
| Karakaya et al. (2024)              | Analisar efeitos de eficiência energética e material no comércio com a UE.                                                                                                 | Indústria e comércio internacional, Turquia e UE                                                                                         | Análise de comércio internacional e eficiência                                                                             | Efeitos compensatórios ~40–60 %                                                                                                                                                                                                     |

No Brasil, embora ainda incipiente, a literatura já mostra sinais claros de efeitos rebote em subsetores industriais estratégicos, apontando para a importância de incorporar esse fenômeno no planejamento energético e nas políticas públicas. A próxima seção aprofundará justamente as medidas de mitigação propostas pela literatura e pelas experiências internacionais, destacando caminhos possíveis para reduzir a magnitude dos efeitos rebote e ampliar a efetividade das políticas de eficiência.

### **2.5.1.**

#### **Evidências internacionais**

Estudos empíricos pioneiros em países industrializados demonstraram que melhorias na eficiência energética frequentemente resultam em reduções menores do que o previsto no consumo de energia. Broberg et al. (2015), utilizando um modelo de equilíbrio geral aplicado à economia sueca, constataram que os ganhos de eficiência em subsetores industriais intensivos em energia levaram a uma expansão de produção que compensou grande parte da economia inicial. O estudo mostrou que, em alguns subsetores, os efeitos rebote chegaram a 70 %, aproximando-se do fenômeno do *backfire*.

Na Alemanha, Berner et al. (2022) analisaram dados em nível micro e observaram que empresas mais eficientes exibiam consumo energético relativamente maior do que seria esperado em função de sua produção. O efeito foi explicado pela expansão das linhas de produção e pelo uso intensificado de máquinas em função da redução dos custos operacionais. Esse achado confirma a hipótese de que o efeito rebote direto, ao reduzir o custo marginal do serviço energético, cria incentivos para a intensificação do uso.

Lutz et al. (2021), em estudo também baseado na indústria alemã, identificaram que os efeitos rebote variam substancialmente entre subsetores. Enquanto em indústrias químicas e metalúrgicas os efeitos rebote são elevados, em subsetores menos intensivos em energia os ganhos de eficiência tendem a se refletir mais diretamente em redução de consumo. Essa heterogeneidade reforça a importância de análises setoriais, em oposição a médias agregadas que podem mascarar diferenças cruciais.

Outro exemplo significativo vem da Suíça. Zimmermann et al. (2021; 2022) avaliaram os efeitos de programas industriais de eficiência energética e concluíram que, embora as empresas participantes tenham reduzido sua intensidade energética, o consumo absoluto permaneceu elevado devido à expansão da atividade produtiva. Esses resultados ilustram a dificuldade de alcançar reduções absolutas de emissões apenas por meio de políticas de eficiência, sem instrumentos complementares.

No contexto chinês, Li e Lin (2017) compararam o efeito rebote em subsetores

pesados e leves, demonstrando que os primeiros exibem taxas de efeito rebote muito superiores em função de sua maior elasticidade da demanda energética. Já Li et al. (2019) analisaram reformas de mercado e observaram que a liberalização econômica ampliou o efeito rebote, pois aumentou a sensibilidade das empresas a variações de preço e incentivou a expansão da produção em resposta a ganhos de eficiência.

Pesquisas recentes em outros países confirmam essa tendência. Jin e Yu (2022) mostraram que o avanço das tecnologias de informação e comunicação em subsetores industriais intensivos em energia na China gerou efeitos rebote relevantes, à medida que a digitalização ampliou a escala produtiva. Ahmann et al. (2022) destacaram o caso da indústria alemã, onde políticas de eficiência precisam ser desenhadas de forma articulada para evitar efeitos de neutralização.

### **2.5.2.**

#### **Evidências em países emergentes**

Nos países emergentes, o efeito rebote tende a ser ainda mais pronunciado devido às altas taxas de crescimento econômico e à crescente industrialização. Cansino et al. (2022), em estudo sobre a Espanha – um país que passou por rápida modernização industrial –, mostraram que melhorias de eficiência energética não resultaram em reduções proporcionais de consumo, justamente porque foram acompanhadas de forte expansão da produção.

Na Turquia, Karakaya et al. (2024) analisaram os efeitos de eficiência de materiais e energia no comércio com a União Europeia. O estudo revelou que, embora tenham ocorrido ganhos em eficiência, os padrões de comércio e produção compensaram boa parte dos benefícios, indicando que os efeitos rebote não se limitam ao consumo doméstico, mas também se manifestam nas cadeias globais de valor.

No Irã, Safarzadeh et al. (2020) avaliaram políticas de eficiência em subsetores industriais e identificaram que os instrumentos de incentivo, quando aplicados isoladamente, resultaram em efeitos rebote significativos. O estudo concluiu que apenas combinações de políticas – incluindo regulação, precificação e subsídios – foram capazes de reduzir a magnitude do fenômeno.

Essas evidências mostram que, em países em desenvolvimento ou em processo de transição econômica, o efeito rebote não é apenas um risco potencial, mas uma realidade concreta que limita a efetividade das políticas de eficiência energética.

### **2.5.3. Evidências no Brasil**

No Brasil, a análise empírica do efeito rebote na indústria ainda é incipiente, mas estudos recentes indicam sua presença. Fortes et al. (2020), ao avaliar o impacto econômico do uso de motores de alto rendimento, concluíram que, embora tais motores reduzam significativamente o consumo específico de energia, o ganho de competitividade resultante pode levar à expansão da produção e, portanto, a um aumento no consumo agregado.

Relatórios da EPE (2024b; 2025) apontam que, mesmo com a adoção de programas de eficiência energética, o consumo total da indústria brasileira continua crescendo em linha com a expansão do Produto Interno Bruto (PIB). Esse dado sugere que, em nível agregado, os efeitos rebote macroeconômicos têm neutralizado parte dos ganhos obtidos. Além disso, o setor industrial brasileiro apresenta grande heterogeneidade tecnológica, o que implica diferentes magnitudes de efeito rebote entre subsetores intensivos (como siderurgia e química) e subsetores menos intensivos (como têxtil e alimentos).

Pesquisas aplicadas no contexto de políticas públicas também corroboram esse diagnóstico. Estudos vinculados ao Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) mostram que a introdução de tecnologias eficientes em subsetores industriais não resulta, necessariamente, em redução proporcional da demanda elétrica. Isso reforça a necessidade de ampliar a base empírica nacional sobre o tema e integrar a perspectiva do efeito rebote no planejamento energético de longo prazo.

### **2.5.4. Papel das políticas públicas nas evidências empíricas**

Uma constante na literatura é a heterogeneidade setorial dos efeitos rebote. Subsetores de alta intensidade energética, como siderurgia, cimento e química, apresentam efeitos rebote mais elevados porque os ganhos de eficiência se traduzem em reduções significativas de custos unitários, incentivando a expansão da produção. Em contraste, subsetores de baixa intensidade energética, como têxtil e serviços associados, tendem a apresentar efeitos rebote menores (Li e Lin, 2017; Lutz et al., 2021).

Esse padrão também foi observado por Zimmermann et al. (2021; 2022), que destacaram que políticas genéricas de eficiência podem ser insuficientes. Em vez disso, políticas setoriais específicas, que considerem a estrutura de custos e a elasticidade da demanda de cada subsetor, são mais eficazes na mitigação dos efeitos rebote.

Diversos estudos mostram que a magnitude dos efeitos rebote não é apenas função de fatores econômicos e tecnológicos, mas também de políticas públicas e regulações. Du et al. (2023) demonstraram que regulações ambientais rigorosas podem reduzir significativamente os efeitos rebote na indústria chinesa. Da mesma forma, Freire-González (2021) argumenta que políticas de eficiência energética devem ser acompanhadas de instrumentos regulatórios para governar o paradoxo de Jevons.

Steren et al. (2022) acrescentam que políticas focadas apenas no consumidor final podem falhar em reduzir o consumo total de energia no longo prazo, se não forem acompanhadas de medidas estruturais que considerem o efeito rebote em nível macroeconômico. Essa conclusão é particularmente relevante para a indústria, em que a expansão da produção frequentemente supera os ganhos unitários de eficiência energética.

## **2.6.**

### **Medidas para mitigação de efeitos rebote da eficiência energética na indústria**

A evidência de que avanços em eficiência energética podem gerar efeitos compensatórios capazes de reduzir, neutralizar ou até anular os ganhos inicialmente previstos deslocou o debate sobre o tema para o cerne das discussões acadêmicas e de formulação de políticas públicas. Mais do que uma questão restrita à inovação tecnológica de sistemas e equipamentos e à sua adoção no setor industrial, a mitigação dos efeitos rebote exige a integração da eficiência energética a um conjunto articulado de políticas públicas, regulatórias, fiscais e comportamentais que orientem a demanda e o consumo em direção a trajetórias efetivamente sustentáveis.

Nesse contexto, as medidas propostas pela literatura podem ser organizadas em cinco eixos centrais: (i) regulação, por meio de padrões mínimos de desempenho e certificações obrigatórias; (ii) precificação, com instrumentos como taxação energética e precificação de carbono; (iii) subsídios condicionados, vinculando incentivos financeiros a reduções líquidas comprovadas de consumo; (iv) informação e comportamento, promovendo capacitação e conscientização de agentes econômicos; e (v) inovação tecnológica, estimulando soluções disruptivas e complementares de monitoramento e gestão da energia.

Embora cada eixo contribua de maneira relevante, a literatura converge em reconhecer que nenhum deles é suficiente isoladamente. Apenas quando implementados de forma combinada e articulada é possível reduzir de modo substantivo a magnitude dos efeitos rebote, sobretudo nos subsetores industriais mais intensivos em energia.

Como se examinará nas subseções seguintes, os estudos recentes apontam que políticas integradas, governança multinível e inovação sistêmica representam os caminhos mais promissores para que a eficiência energética transcenda o plano técnico e se traduza, de fato, em sustentabilidade ambiental e competitividade de longo prazo.

### **2.6.1.**

#### **Princípios orientadores da mitigação**

De modo geral, a literatura converge em torno de alguns princípios centrais para a mitigação do efeito rebote. O primeiro é o reconhecimento explícito do fenômeno na formulação de políticas de eficiência. Como afirmam Gillingham, Rapson e Wagner (2015), ignorar a existência do efeito rebote leva à superestimação dos benefícios da eficiência e compromete a credibilidade das políticas energéticas. O segundo princípio é a integração de instrumentos, uma vez que nenhuma medida isolada é suficiente para mitigar de forma abrangente os diferentes tipos de efeito rebote (direto, indireto, macroeconômico e comportamental). O terceiro princípio é a adaptação às especificidades setoriais e nacionais, já que a magnitude e os mecanismos do efeito rebote variam em função de estruturas produtivas, níveis de renda e contextos institucionais (Zimmermann et al., 2021; 2022; Cansino et al., 2022).

### **2.6.2.**

#### **Instrumentos regulatórios**

Os instrumentos regulatórios ocupam papel central na mitigação dos efeitos rebote. Normas de desempenho mínimo, padrões de eficiência obrigatórios e certificações técnicas podem limitar o espaço para respostas compensatórias. No entanto, como argumentam Safarzadeh et al. (2020), regulamentos devem ser desenhados em combinação com outros instrumentos, pois sozinhos podem apenas deslocar os efeitos para outros setores ou etapas do ciclo produtivo.

Na União Europeia, os padrões mínimos de eficiência energética para equipamentos industriais têm sido fundamentais para reduzir consumos específicos, mas a Comissão Europeia reconhece que tais padrões precisam ser acompanhados de instrumentos econômicos para evitar expansão da escala de uso (Karakaya et al., 2024). No Brasil, o PROCEL e o Programa de Eficiência Energética da ANEEL têm avançado em rotulagem e regulamentação técnica, mas ainda carecem de mecanismos que considerem explicitamente os efeitos de rebote.

### **2.6.3. Instrumentos fiscais e de mercado**

Entre os instrumentos econômicos, destacam-se a precificação do carbono e a tributação energética. Ao internalizar externalidades ambientais, esses mecanismos limitam a redução do custo relativo dos serviços energéticos, reduzindo assim o incentivo ao aumento de uso. Saunders (2000) e Freire-González (2021) defendem que o preço da energia deve refletir seus custos ambientais para que os ganhos de eficiência resultem em reduções absolutas de consumo.

Experiências internacionais corroboram essa visão. Du, Liu e Zhao (2023) mostram que a regulação ambiental na China reduziu significativamente os efeitos rebote, justamente porque aumentou os custos associados ao consumo energético. Da mesma forma, Cansino et al. (2022) sugerem que a decomposição dos efeitos rebote da eficiência energética na Espanha pode ser mitigada por políticas de precificação que mantenham altos os custos relativos da energia mesmo diante da eficiência tecnológica.

Outro instrumento relevante são os mercados de cotas de emissões de gases com efeito de estufa (GEE). Ao estabelecer tetos absolutos de emissões, tais mecanismos podem neutralizar efeitos rebote macroeconômicos, pois mesmo que o consumo energético aumente, o total de emissões permanece limitado. Essa lógica é visível no Sistema Europeu de Comércio de Emissões (EU ETS, do inglês *EU Emissions Trading System*), que, embora apresente desafios de implementação, determina um limite máximo para as emissões de gases com efeito de estufa da indústria.

### **2.6.4. Subsídios e incentivos condicionados**

Subsídios e linhas de crédito para tecnologias eficientes são amplamente utilizados como instrumentos de promoção da eficiência. Contudo, quando aplicados de forma isolada, podem agravar os efeitos rebote ao reduzir ainda mais o custo relativo do serviço energético. Safarzadeh et al. (2020) ressaltam que subsídios devem ser condicionados a contrapartidas, como compromissos de redução absoluta de consumo ou adoção simultânea de práticas de gestão da energia.

No Brasil, programas de financiamento de eficiência energética, como os conduzidos pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), poderiam ser desenhados de modo a incluir cláusulas de mitigação de efeitos rebote, vinculando a liberação de recursos a

auditorias energéticas e metas de redução líquida de emissões.

#### **2.6.5.**

##### **Medidas de informação e mudança comportamental**

Uma dimensão frequentemente negligenciada é a informação ao consumidor e às empresas. Sonnberger e Gross (2018) enfatizam que práticas sociais e percepções de legitimidade influenciam intensamente o comportamento diante da eficiência. Campanhas de conscientização que esclareçam sobre a existência do efeito rebote podem induzir padrões de uso mais racionais, evitando a intensificação desnecessária de consumo.

Zimmermann et al. (2021; 2022) observaram na Suíça que empresas que receberam treinamento em gestão de energia apresentaram menor propensão a expandir horários de operação em função da eficiência. Esse resultado sugere que a capacitação em gestão energética é instrumento eficaz de mitigação.

#### **2.6.6.**

##### **Abordagens tecnológicas e de inovação sistêmica**

Além de instrumentos regulatórios, fiscais e comportamentais, há também medidas tecnológicas voltadas à mitigação. Uma delas é a promoção de inovações disruptivas, capazes de modificar não apenas a intensidade energética, mas também os modelos de produção e consumo. Metic e Pigosso (2022a; 2022b), ao estudar a economia circular, argumentam que repensar fluxos de materiais e cadeias de valor pode reduzir a dependência estrutural de energia, mitigando efeitos rebote de longo prazo.

Outra estratégia é a difusão de tecnologias complementares, como sistemas de monitoramento digital e inteligência artificial, que permitem verificar em tempo real se ganhos de eficiência estão sendo compensados por aumentos de uso. Jin e Yu (2022) destacam que, embora a digitalização possa gerar novos efeitos rebote, ela também oferece ferramentas para controlá-los mediante análise de dados e otimização operacional.

#### **2.6.7.**

##### **Limitações das medidas para mitigação de efeitos rebote na indústria**

Apesar das diversas medidas propostas, a literatura reconhece que nenhum instrumento é capaz de eliminar completamente os efeitos rebote. Primeiro, porque o fenômeno está enraizado em mecanismos econômicos fundamentais – como elasticidades

de demanda – que não podem ser suprimidos integralmente sem comprometer a lógica de mercado. Segundo, porque há efeitos de segunda ordem que dificilmente são previstos ou controlados, como mudanças estruturais em cadeias de valor ou inovações não antecipadas (Brockway et al., 2021).

Outro desafio é a aceitação política e social. Políticas de precificação de carbono ou restrição de subsídios muitas vezes enfrentam resistência por parte de empresas e consumidores. Motavasseli (2024) argumenta que a heterogeneidade socioeconômica torna ainda mais difícil implementar medidas homogêneas de mitigação, já que diferentes grupos de renda respondem de maneiras distintas às políticas de eficiência.

As tendências apontam para uma crescente adoção de estratégias híbridas, que combinem instrumentos regulatórios, fiscais, comportamentais e tecnológicos. Guzzo et al. (2024) sugerem que o uso de modelos dinâmicos de simulação pode ajudar formuladores de políticas a antecipar consequências não intencionais e desenhar medidas adaptativas. Além disso, a integração entre políticas de eficiência energética e estratégias de descarbonização mais amplas – como eletrificação, energias renováveis e economia circular – representa um caminho promissor para reduzir estruturalmente os riscos de efeito rebote.

No Brasil, a incorporação explícita do conceito de efeito rebote em documentos estratégicos, como o Plano Nacional de Energia 2050 e os Planos Decenais de Expansão de Energia, seria um passo essencial para alinhar políticas industriais e energéticas às metas climáticas. Programas de capacitação industrial, combinados a regulação e instrumentos de mercado, podem constituir uma estratégia integrada para mitigar os efeitos rebote e maximizar os benefícios líquidos da eficiência energética.

Diversos autores defendem que a mitigação do efeito rebote exige políticas integradas. Gillingham et al. (2015) sugerem que instrumentos de eficiência só são efetivos quando combinados com regulação, precificação e informação. Freire-González (2021) vai além ao propor a noção de governança do paradoxo de Jevons, em que diferentes níveis de governo e setores econômicos atuam de forma coordenada.

Exemplos concretos dessa abordagem integrada incluem os planos nacionais de eficiência energética em países europeus, que combinam metas de intensidade com instrumentos fiscais, campanhas educativas e regulação setorial. Na China, a combinação de investimentos em inovação tecnológica com regulamentação ambiental foi essencial para reduzir a magnitude dos efeitos rebote da eficiência energética na indústria (Du, Liu e Zhao, 2023).

## 2.7.

### Considerações finais do capítulo

O presente capítulo reuniu e discutiu os principais avanços teóricos, tipológicos, metodológicos e empíricos da literatura sobre efeitos rebote associados à eficiência energética. Partindo das formulações clássicas do Paradoxo de Jevons, exploraram-se as diferentes classificações do fenômeno (efeitos rebote diretos, indiretos, macroeconômicos e comportamentais), seus mecanismos de formação e determinantes, bem como as metodologias predominantes na quantificação e avaliação – desde análises econométricas baseadas em elasticidades, modelos de equilíbrio geral computável (CGE), abordagens de dinâmica de sistemas e até métodos híbridos recentes. Foram igualmente examinadas as evidências empíricas em contextos internacionais e nacionais, com destaque para a indústria, onde a intensidade energética e as pressões competitivas tornam os efeitos rebote particularmente relevantes. Por fim, discutiram-se as medidas de mitigação propostas na literatura, ao mesmo tempo em que se reconheceram limitações persistentes e desafios emergentes.

A análise crítica dessas contribuições permitiu identificar três grandes lacunas neste campo de pesquisa. A primeira diz respeito à fragmentação conceitual e metodológica. Apesar do acúmulo de evidências, a literatura ainda carece de modelos integrados capazes de capturar simultaneamente os efeitos diretos, indiretos e macroeconômicos em horizontes de longo prazo. Estudos econométricos oferecem estimativas robustas para contextos específicos, mas se limitam a relações lineares de curto prazo. Já os modelos de equilíbrio geral incorporam interações entre setores, mas dependem de hipóteses restritivas. A dinâmica de sistemas, por sua vez, consegue representar ciclos de retroalimentação, mas enfrenta desafios de validação empírica. A integração entre essas tradições analíticas permanece incipiente.

A segunda lacuna refere-se à escassez de estudos aplicados ao setor industrial brasileiro. Embora experiências internacionais, notadamente em países europeus e asiáticos, revelem magnitudes significativas do efeito rebote, ainda há insuficiência de análises sistemáticas sobre como esse fenômeno se manifesta na indústria nacional. Os poucos estudos existentes – como os de Fortes, Sousa e Borba (2020) e relatórios recentes da EPE (2024b; 2025) – indicam a presença de efeitos rebote relevantes no uso de motores elétricos industriais e em programas de eficiência, mas não oferecem modelos integrados capazes de projetar cenários prospectivos de longo prazo até 2050.

A terceira lacuna situa-se na articulação entre teoria sobre efeitos rebote da

eficiência energética e políticas públicas. A literatura reconhece a necessidade de mitigar esses efeitos por meio de instrumentos regulatórios, fiscais e informacionais (Gillingham et al., 2015; Freire-González, 2021; Du, Liu e Zhao, 2023), mas raramente traduz essas recomendações em modelos prospectivos que permitam avaliar *ex ante* os efeitos líquidos das políticas públicas em diferentes cenários de desenvolvimento. Assim, há uma distância entre a sofisticação conceitual dos estudos acadêmicos e a aplicabilidade prática das recomendações para gestores públicos e gestores industriais.

Diante dessas lacunas identificadas, a presente pesquisa propõe-se a responder especificamente às duas primeiras. Para tal, desenvolve um modelo conceitual baseado em uma abordagem metodológica inovadora de natureza sistêmica e híbrida, fundamentada na articulação entre a dinâmica de sistemas (Forrester, 1958; 1961) e a prospectiva estratégica (Godet, 2000). O modelo integrado resultante é aplicado ao contexto específico da eficiência energética de motores elétricos industriais no cenário brasileiro, estabelecendo projeções até o horizonte temporal de 2050.

A originalidade metodológica desta investigação reside na convergência sinérgica dessas duas correntes teóricas, tradicionalmente abordadas de forma isolada na literatura especializada. A dinâmica de sistemas oferece o arcabouço conceitual para compreender as inter-relações complexas e os mecanismos de *feedback* que governam os sistemas energético-industriais, enquanto a prospectiva estratégica fornece os instrumentos analíticos necessários para a construção de cenários futuros consistentes e a identificação de variáveis-chave que influenciam a trajetória do sistema.

Esta convergência metodológica visa preencher uma lacuna identificada no campo de estudos energéticos, particularmente no que se refere à análise prospectiva de tecnologias de eficiência energética em contextos industriais emergentes. Assim, a contribuição desta tese transcende o caso específico dos motores elétricos industriais brasileiros, oferecendo um framework metodológico replicável e adaptável a outras tecnologias e contextos geográficos, ampliando substantivamente as possibilidades de análise sistêmica e projeção estratégica em cenários de longo prazo no campo da eficiência energética industrial. Esta abordagem híbrida possibilitará não apenas a caracterização e quantificação sistemática do efeito rebote em suas múltiplas dimensões e complexidades, mas também a identificação antecipada de pontos críticos e janelas de oportunidade para estratégias de mitigação. Dessa forma, espera-se fornecer subsídios técnico-científicos robustos para a formulação de políticas públicas nacionais que promovam a convergência entre objetivos de eficiência energética, competitividade

industrial e sustentabilidade ambiental.

A eficiência energética, embora fundamental para descarbonização, não constitui solução suficiente quando analisada isoladamente. Os efeitos rebote emergem como barreira estrutural que transcende questões técnicas, exigindo reconhecimento explícito e quantificação rigorosa. A articulação entre modelagem dinâmica de sistemas e prospectiva estratégica apresenta-se como abordagem promissora para superar limitações das análises convencionais, permitindo antever trajetórias que conciliem imperativos econômicos, energéticos e ambientais. Busca-se que o planejamento energético nacional incorpore sistematicamente os mecanismos de retroalimentação dos efeitos rebote, convertendo-os de obstáculos não reconhecidos em variáveis explícitas na formulação de políticas sustentáveis.

### **3**

## **Modelo conceitual para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil**

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de um modelo conceitual destinado à estimativa de efeitos rebote decorrentes de melhorias na eficiência energética de motores elétricos industriais no contexto brasileiro, considerando diferentes cenários prospectivos até o horizonte temporal de 2050. O modelo fundamenta-se em uma abordagem metodológica inovadora de natureza sistêmica e híbrida, que articula sistematicamente a dinâmica de sistemas (Forrester, 1958; 1961; Sterman, 2000) com a prospectiva estratégica (Godet, 1993; 2000).

Esta proposta metodológica emerge como resposta direta às principais lacunas identificadas na revisão crítica da literatura apresentada no capítulo anterior, particularmente no que se refere à fragmentação conceitual dos estudos existentes e à necessidade premente de abordagens sistêmicas integradas capazes de capturar a complexidade inerente aos fenômenos de eficiência energética e efeitos rebote em contextos industriais.

O modelo conceitual proposto estrutura-se em três componentes principais: (i) módulo de prospectiva estratégica para construção de cenários futuros consistentes; e (ii) módulo de dinâmica de sistemas para modelagem quantitativa das interrelações complexas entre variáveis do sistema energético-industrial.

### **3.1.**

#### **Visão geral do modelo**

O fluxograma apresentado na Figura 3.1 fornece uma visão geral do modelo conceitual para estimar os efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050, segundo uma abordagem sistêmica híbrida.

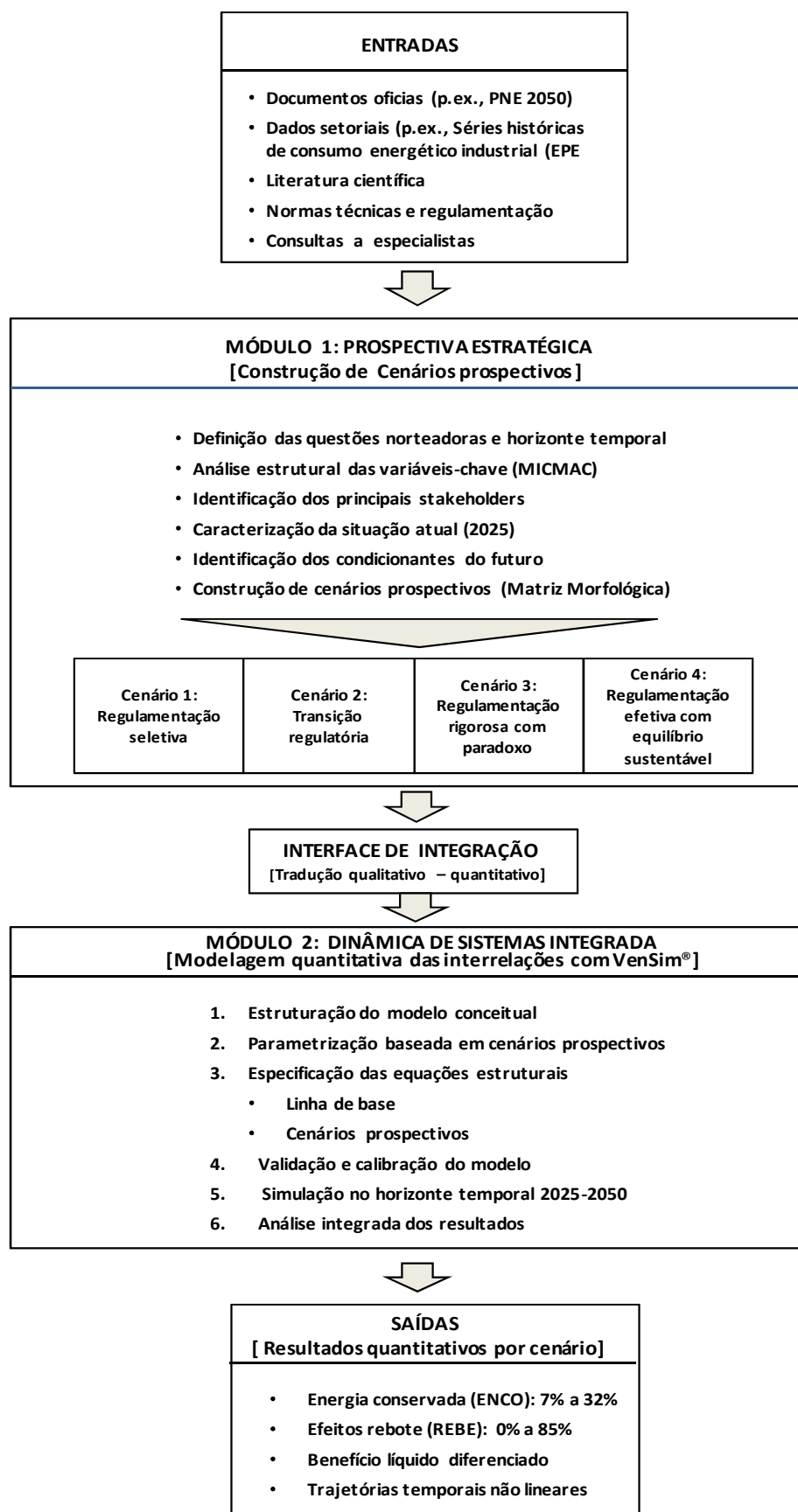


Figura 3.1 – Modelo conceitual para estimativa de efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil até 2050

### 3.2.

#### **Módulo de prospectiva estratégica para construção de cenários futuros**

A prospectiva estratégica, conforme desenvolvida por Godet (2000), constitui uma abordagem metodológica que transcende a simples previsão, buscando construir visões estruturadas de futuros possíveis através da análise sistemática das variáveis-chave que moldam a evolução de um sistema. Esta metodologia fundamenta-se no princípio de que o futuro não é predeterminado, mas resulta da interação dinâmica entre múltiplas forças motrizes, condicionantes e decisões dos atores envolvidos.

O módulo de prospectiva estratégica do modelo aqui proposto integra ferramentas analíticas específicas que permitem identificar, hierarquizar e relacionar as variáveis fundamentais do sistema em foco. Através da análise estrutural, análise de *stakeholders* e construção de cenários prospectivos com suporte de matrizes morfológicas (Zwicky, 1969), busca-se mapear o espaço de possibilidades futuras de forma sistemática e rigorosa, evitando tanto o determinismo quanto a aleatoriedade nas projeções quantitativas dos efeitos rebote decorrentes da eficiência energética de motores elétricos industriais no contexto brasileiro até o horizonte de 2050.

#### 3.2.1.

##### **Definição das questões norteadoras e horizonte temporal**

A definição das questões norteadoras constitui etapa fundamental da construção de cenários prospectivos, pois estabelece o foco analítico e delimita o escopo do exercício prospectivo (Godet, 2000). Essas questões devem ser formuladas de modo a capturar as incertezas críticas sobre o futuro do sistema, orientando tanto a identificação das variáveis-chave quanto a construção dos cenários alternativos.

No contexto desta pesquisa, as questões norteadoras devem ser estruturadas para abranger múltiplas dimensões da eficiência energética de motores elétricos industriais: (i) evolução do marco regulatório; (ii) dinâmicas socioeconômicas, (iii) potencial de inovação e difusão tecnológica; e centralmente, (iv) a manifestação de efeitos rebote associados à eficiência energética de motores elétricos industriais.

A definição do horizonte temporal deve ser alinhada às diretrizes estratégicas nacionais estabelecidas no Plano Nacional de Energia 2050, conferindo consistência metodológica e relevância para o planejamento energético nacional. Este prazo permite capturar tanto transformações tecnológicas incrementais quanto mudanças estruturais no sistema energético-industrial brasileiro.

### 3.2.2.

#### Recenseamento e classificação das variáveis-chave: uso da análise estrutural

A análise estrutural representa uma das ferramentas centrais da prospectiva estratégica, permitindo identificar e hierarquizar as variáveis que exercem maior influência sobre a evolução do sistema estudado (Godet, 2000, p. 65-66). Sua aplicação compreende as seguintes fases:

- Fase 1: Recenseamento das variáveis internas e externas do sistema, i.e. evolução da eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil. Esta fase consiste na identificação e definição rigorosa das variáveis-chave, mediante consulta a especialistas e revisão bibliográfica, selecionando-se de 10 a 20 variáveis;
- Fase 2: Descrição das relações entre variáveis, compreendendo a construção da matriz de influência direta ( $n \times n-1$  questões).
- Fase 3: Identificação das variáveis-chave pelo *software* MICMAC® (LIPSOR, 2025), classificando-as pela classificação direta (simples) e classificação indireta via multiplicações matriciais.

Na Fase 1, definiu-se um conjunto de onze variáveis-chave dos cenários prospectivos de eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil, conforme apresentado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Descrição das variáveis-chave dos cenários prospectivos de eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil

| Variável-chave                                                                  | Definição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos novos (PEEE) | Conjunto de políticas públicas, como incentivos fiscais, subsídios e programas de financiamento de motores de alto desempenho energético, destinados a promover a adoção de motores elétricos novos de alta eficiência no setor industrial.                                                                                                             |
| Política de desempenho energético dos motores elétricos (MEPS)                  | Trata das regulamentações governamentais que estabelecem padrões mínimos de eficiência energética para motores elétricos novos e reconicionados, visando reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa. Também considera o estabelecimento de mecanismos específicos de fiscalização para oficinas de reconicionamento.          |
| Inovação tecnológica e de processos do segmento de motores elétricos (INOV)     | Desenvolvimento e implementação de novas tecnologias (e.g., materiais supercondutores, designs otimizados, sensores e controles inteligentes), materiais (e.g., aços de alta permeabilidade, isolantes avançados) e processos de fabricação e reconicionamento de motores elétricos, visando aumentar a eficiência, a durabilidade e a reciclabilidade. |

| Variável-chave                                                                                                                                   | Definição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Custo comparativo entre motores novos e reconicionados (CUST)                                                                                    | Diferença de custo ao longo do ciclo de vida entre motores elétricos novos e reconicionados, considerando custos de aquisição, instalação, manutenção, consumo de energia e descarte. Esta variável influencia a decisão de compra das empresas industriais, especialmente em diferentes contextos econômicos e regulatórios.                                                                                                 |
| Taxa de adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos (INRC)                                            | Velocidade com que as empresas de serviços de reconicionamento de motores elétricos adotam novas tecnologias (e.g.: sistemas de diagnóstico avançados, técnicas de balanceamento de alta precisão, utilização de estufas para secagem dos motores reconicionados) e práticas inovadoras para melhorar a qualidade, a eficiência e a durabilidade dos motores reconicionados.                                                  |
| Nível de conscientização e percepção por parte das empresas do setor industrial sobre motores elétricos reconicionados (CPRC)                    | Grau de conhecimento e aceitação das empresas industriais em relação aos motores elétricos reconicionados, influenciado por fatores como custo-benefício, confiança na qualidade, garantia, desempenho energético, impacto ambiental e disponibilidade de informações técnicas.                                                                                                                                               |
| Participação de motores elétricos novos de alta eficiência, reconicionados e importados de baixa eficiência no setor industrial no Brasil (MERC) | Distribuição percentual da participação de mercado entre a aquisição de motores novos, reconicionados e importados pelas empresas do setor industrial no Brasil. Essa variável reflete as preferências do mercado, as políticas de manutenção no setor industrial e o nível de conscientização e percepção por parte da indústria sobre a qualidade e durabilidade dos motores.                                               |
| Preço de energia elétrica no Brasil (PREC)                                                                                                       | Custo da eletricidade para o setor industrial no Brasil, considerando diferentes tarifas no mercado regulado e preço no mercado livre, além de impostos e subsídios. O preço da energia elétrica a viabilidade econômica da adoção de motores mais eficientes e a busca por alternativas como motores reconicionados, bem como a intensidade do efeito rebote.                                                                |
| Potencial de extensão da vida útil de motores usados (VIDA)                                                                                      | Estimativa do tempo adicional de operação que um motor elétrico usado pode ter, através de reconicionamento, manutenção preditiva e outras práticas de extensão de vida útil. Esta variável considera fatores como a qualidade original do motor, o histórico de manutenção, as condições de operação e as tecnologias de reconicionamento aplicadas.                                                                         |
| Efeito rebote resultante da EE de motores elétricos de uso industrial (REBE)                                                                     | Aumento no consumo de energia resultante da maior eficiência dos motores elétricos, em especiais os novos de alta eficiência, devido a fatores como a redução dos custos operacionais que levam a um aumento na produção ou à utilização mais intensiva dos equipamentos. Este efeito é quantificado como a diferença entre a redução esperada no consumo de energia com a melhoria da eficiência e a redução real observada. |
| Energia conservada (ENCO)                                                                                                                        | Aumento potencial da energia conservada pela adoção de motores elétricos mais eficientes no setor industrial. A variável reflete o impacto positivo das medidas de eficiência energética no consumo de energia elétrica.                                                                                                                                                                                                      |

Uma vez definidas as variáveis-chave, a próxima fase refere-se à análise das relações entre variáveis, compreendendo a construção da matriz de influência direta ( $n \times n-1$  questões), a ser preenchida pelos especialistas da seguinte forma. Para cada par de variáveis, deve ser feita a seguinte pergunta:

“Existe uma influência direta da variável  $i$  sobre a variável  $j$ ?”

Caso nenhuma influência direta fosse identificada, atribuíria-se o valor “0”. Quando houvesse influência, esta era classificada em três níveis: fraca “1”, moderada “2” ou forte “3”.

Na Fase 3, o emprego do *software* MICMAC® (LIPSOR, 2025) facilita a operacionalização desta análise ao automatizar os cálculos matriciais e gerar visualizações que revelam a estrutura do sistema, como mostra o mapa genérico de influência-dependência das variáveis-chave (Figura 3.2).

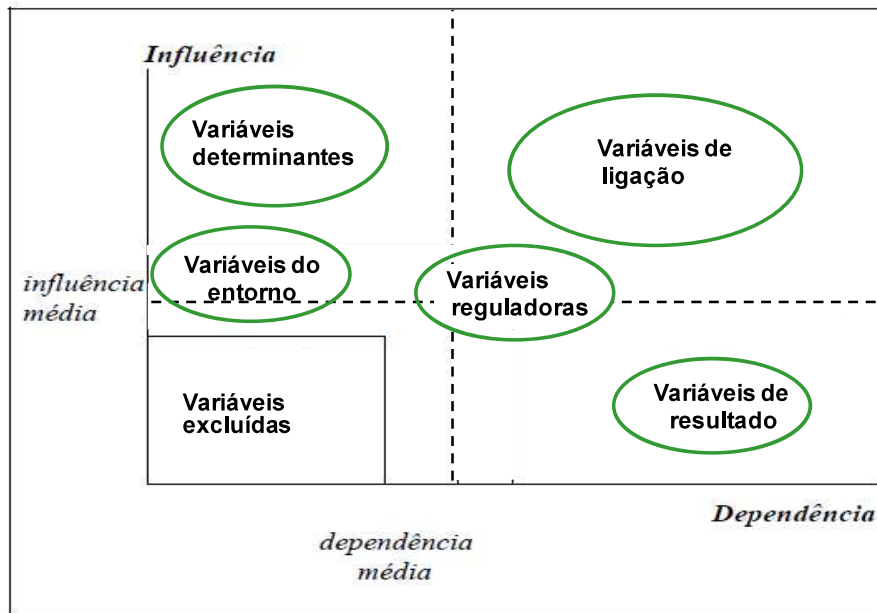


Figura 3.2 – Mapa genérico de influência-dependência das variáveis-chave

Fonte: Baseado em Godet (2000, p. 68).

Para capturar influências indiretas, o *software* MICMAC® (LIPSOR, 2025) executa os seguintes procedimentos:

$$M^2 = M \times M, M^3 = M^2 \times M, \dots \quad (1)$$

Cada potência adiciona um nível de influência indireta:

- $M^2$ : Influência indireta de segunda ordem;
- $M^3$ : Influência indireta de terceira ordem, e assim por diante.

Para o critério de convergência, o objetivo é somar essas matrizes até que os novos termos não alterem significativamente os resultados. Assim:

$$S_k = M + M + M^3 + \dots M^k \quad (2)$$

A convergência ocorre quando  $S_{k+1} - S_k = 0$ . Em sistemas bem comportados, isso acontece porque os valores tendem a estabilizar (as influências indiretas adicionais

ficam insignificantes). Cada multiplicação propaga as influências através da rede de variáveis. Quando as potências crescentes não mudam mais a estrutura (ou mudam muito pouco), significa que já capturamos todas as cadeias relevantes das influências indiretas. Após essa etapa é possível analisar as variáveis com a sua influência e dependência projetadas no mapa (Figura 3.2) de acordo com as categorias abaixo.

Conforme Godet (2000, p.64-69), a análise estrutural permite classificar as variáveis em diferentes categorias funcionais baseadas em sua influência e dependência:

- Variáveis determinantes ou forças-motrizes (alta influência, baixa dependência): São as variáveis mais importantes para explicar a evolução do sistema, pois condicionam o resto do sistema. Pequenas mudanças nessas variáveis podem ter grandes impactos.
- Variáveis de ligação (alta influência, alta dependência): São ao mesmo tempo muito influentes e muito dependentes. Constituem fatores de instabilidade do sistema. Qualquer ação sobre essas variáveis repercute sobre as outras.
- Variáveis de resultado (baixa influência, alta dependência): São pouco influentes, mas muito dependentes. Refletem a evolução do sistema. Frequentemente são expresas em indicadores de desempenho.
- Variáveis reguladoras (influência, e dependência médias): Servem de "termostato" do sistema. Exercem papel regulador na evolução das outras variáveis-chave.
- Variáveis do entorno (baixa influência, baixa dependência): Evoluem de forma autônoma. Não são determinantes para o futuro do sistema.

### **3.2.3. Identificação dos principais *stakeholders***

A identificação e análise dos principais *stakeholders* constituem etapas essenciais da prospectiva estratégica, pois reconhecem que a evolução dos sistemas sociotécnicos resulta das estratégias, decisões e interações entre múltiplos atores (Godet, 2000).

Baseando-se na teoria dos *stakeholders* (Freeman et al., 2010), que define *stakeholders* como qualquer grupo ou indivíduo que pode afetar ou é afetado pelos objetivos organizacionais, esta análise deve abranger desde formuladores de políticas públicas até empresas usuárias, fabricantes de motores elétricos para uso industrial, gestores de diversos subsetores industriais, organismos reguladores e Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs). Essa abordagem sistêmica reconhece que a eficiência

energética de motores industriais resulta da interação complexa entre múltiplos atores com interesses convergentes e divergentes, cujas estratégias e decisões moldam coletivamente as trajetórias futuras do sistema.

A metodologia de análise de *stakeholders* envolve três etapas complementares: (i) identificação dos atores relevantes, (ii) caracterização de seus objetivos e recursos de poder, e (iii) mapeamento das convergências e divergências de interesses. (Godet, 2000). Esta análise permite compreender as dinâmicas políticas e econômicas que influenciam as trajetórias futuras do sistema, informando a construção de cenários mais realistas e politicamente viáveis.

A consideração dos *stakeholders* na etapa de cenarização é particularmente importante para a análise de efeitos rebote, uma vez que estes fenômenos resultam de decisões descentralizadas de múltiplos atores econômicos respondendo a incentivos e restrições específicas.

#### **3.2.4. Caracterização sistemática da situação atual**

A caracterização sistemática da situação atual constitui linha de base fundamental para o exercício prospectivo, estabelecendo o ponto de partida a partir do qual as trajetórias futuras são projetadas (Godet, 2000). Esta etapa envolve a coleta e análise de dados quantitativos e qualitativos sobre o estado presente de cada variável-chave identificada.

Nesta etapa do módulo de prospectiva estratégica, combina-se a ferramenta de análise documental com consulta a especialistas e levantamento de dados secundários de fontes oficiais. Particular atenção deve ser dedicada à identificação de tendências emergentes, sinais fracos de mudança e descontinuidades potenciais que possam influenciar as trajetórias futuras do sistema em foco.

Para o sistema de motores elétricos industriais, esta caracterização abrange aspectos tecnológicos (estado da arte, capacidades instaladas), regulatórios (marco legal vigente, políticas em implementação), socioeconômicos (estrutura de custos, incentivos de mercado) e ambientais (impactos energéticos atuais, potencial de conservação).

#### **3.2.5. Identificação dos principais condicionantes do futuro**

A identificação dos condicionantes do futuro constitui etapa metodológica fundamental na construção de cenários prospectivos, conforme preconizado por Godet

(1993). Esta fase visa mapear as forças estruturais e tendências de longo prazo que moldarão a evolução do sistema independentemente das variações específicas de cada cenário, conferindo maior solidez e credibilidade às projeções desenvolvidas.

Segundo a metodologia de Godet (1993), os condicionantes do futuro organizam-se em cinco categorias principais que devem ser sistematicamente identificadas. As tendências de peso representam forças de inércia que se impõem aos atores, como dinâmicas demográficas, evoluções tecnológicas de longo prazo e transformações estruturais da economia. Os fatos portadores de futuro constituem eventos ou inovações emergentes com potencial de modificar significativamente as trajetórias do sistema. Os fatores predeterminados abrangem elementos já decididos ou em curso que produzirão efeitos inevitáveis no horizonte temporal considerado. As invariantes referem-se a aspectos que permanecem relativamente estáveis ao longo do tempo, como comportamentos humanos fundamentais ou leis econômicas básicas. Finalmente, as alianças entre atores representam configurações de poder e sistemas de relações que tendem a se manter ou evoluir de forma previsível.

No contexto específico da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil, os condicionantes do futuro assumem características particulares que refletem tanto dinâmicas globais quanto especificidades nacionais, como será discutido no Capítulo 4 (Subseção 4.1.5).

A identificação sistemática destes condicionantes permite distinguir entre elementos estruturais duradouros e variações conjunturais temporárias, conferindo maior robustez aos cenários prospectivos construídos. Esta distinção é fundamental para assegurar que os cenários capturem adequadamente tanto as continuidades quanto as possíveis rupturas que caracterizarão a evolução da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050, fornecendo base sólida para a análise quantitativa dos efeitos rebote associados.

### **3.2.6. Construção dos cenários prospectivos**

Cenários prospectivos são construções de futuros possíveis, fundamentadas em conjuntos coerentes de hipóteses sobre o comportamento de variáveis-chave do sistema em estudo (Godet, 2000). Recomenda-se a utilização da investigação morfológica (Zwicky, 1969), seguindo a metodologia de prospecção concebida por esse autor. Trata-se de uma abordagem participativa que cria uma matriz relacionando variáveis-chave,

parâmetros e hipóteses plausíveis. Após essa etapa, uma análise de consistência deve ser aplicada para filtrar apenas as combinações mais prováveis de incertezas críticas, conforme recomenda Amjadi et al. (2022).

A construção de cenários prospectivos representa a síntese metodológica da abordagem de Godet (2000), integrando os resultados das etapas anteriores em narrativas coerentes sobre futuros alternativos.

Definem-se cenários prospectivos como construções de futuros possíveis, fundamentadas em conjuntos coerentes de hipóteses sobre o comportamento de variáveis-chave do sistema em estudo (Godet, 2000).

Nesta etapa, emprega-se a análise morfológica, que é uma abordagem metodológica desenvolvida por Fritz Zwicky durante a Segunda Guerra Mundial e posteriormente refinada para aplicações em prospectiva estratégica. Esta abordagem permite explorar de forma estruturada o vasto campo dos futuros possíveis, evitando tanto o determinismo quanto a aleatoriedade na construção de trajetórias alternativas para o horizonte de longo considerado. Essa ferramenta de prospectiva permite organizar as diferentes hipóteses sobre a evolução de cada variável-chave em um espaço estruturado de possibilidades. A seleção das combinações que darão origem aos cenários prospectivos obedece a critérios de consistência interna, plausibilidade e relevância para os objetivos da pesquisa.

Cada cenário é desenvolvido através de três componentes integrados: (i) matriz morfológica que define as hipóteses específicas para cada variável-chave; (ii) narrativa descritiva que explica a lógica de evolução e as interações entre variáveis; (iii) análise de implicações para os efeitos rebote da eficiência energética. Esta estrutura assegura que os cenários sejam simultaneamente internamente consistentes e úteis para a análise quantitativa subsequente empregando-se a dinâmica de sistemas.

A análise morfológica é conduzida mediante um processo sequencial que inicia com a decomposição sistemática do sistema estudado em suas dimensões ou componentes fundamentais. Para o sistema de eficiência energética de motores elétricos industriais, essa decomposição considera as onze variáveis-chave identificadas na análise estrutural prévia, cada uma representando uma dimensão específica do sistema: políticas públicas de eficiência energética, padrões de desempenho energético, inovação tecnológica, estrutura de custos, adoção de tecnologias de recondicionamento, conscientização industrial, participação de mercado, preços de energia, potencial de extensão de vida útil, efeitos rebote e energia conservada.

A primeira fase da análise morfológica concentra-se na construção do espaço

morfológico, processo que exige decomposição cuidadosa do sistema em componentes o mais independentes possível, mas que simultaneamente representem a totalidade do sistema estudado. Cada componente pode assumir diferentes configurações ou estados, refletindo as diversas hipóteses sobre seu comportamento futuro. A escolha dos componentes constitui etapa delicada que requer reflexão aprofundada, uma vez que componentes omitidos ou configurações essenciais negligenciadas podem resultar na exclusão de faces importantes do campo dos possíveis.

No contexto desta pesquisa, cada variável-chave foi estruturada com configurações principais, representando diferentes níveis de intensidade ou trajetórias evolutivas, como por exemplo: baixa, moderada e alta efetividade para políticas públicas; padrões mínimos, progressivos ou rigorosos para regulamentação; taxas baixas, moderadas ou elevadas para inovação tecnológica. Esta estruturação gera um espaço morfológico inicial de 177.147 combinações teóricamente possíveis, demonstrando a vastidão do campo dos futuros potenciais que devem ser sistematicamente explorados.

Para a geração de cenários prospectivos da evolução da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil, apresenta-se adiante na Figura 3.3 uma matriz morfológica genérica, cujas variáveis-chave foram definidas anteriormente no Quadro 3.1, bem como as hipóteses sobre o comportamento das onze variáveis-chave.

| Cenário n: [Título do cenário prospectivo]                                                                                                       |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Variáveis                                                                                                                                        | Hipóteses                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                                            |
|                                                                                                                                                  | Baixa efetividade                                                                                                                                       | Efetividade moderada                                                                                                                                       | Alta efetividade                                                                                                                                            |                                            |
| Políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos novos (PEEE)                                                                  |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                                            |
| Política de desempenho energético dos motores elétricos (MEPS)                                                                                   | Mínimo IR3 com abrangência parcial. Fiscalização limitada da venda de motores reconicionados.                                                           | Migração para padrões IR3/IR4 com abrangência crescente. Fiscalização moderada da venda de motores reconicionados.                                         | Padrões muito rigorosos (>IR4) obrigatórios. Exigência IR4/IR5 com inversor de frequência. Fiscalização rigorosa da venda de motores reconicionados.        |                                            |
| Inovação tecnológica e de processos do segmento de motores elétricos (INOV)                                                                      | Taxa moderada de inovação; restrita a motores novos.                                                                                                    | Taxa moderada de inovação; para motores novos e para alguns processos dos motores reconicionados.                                                          | Alta taxa de inovação para motores novos e para maior parte dos processos dos motores reconicionados.                                                       |                                            |
| Custo comparativo entre motores novos e reconicionados (CUST)                                                                                    | Custo muito alto de motores novos e eficientes.                                                                                                         | Custo alto de motores novos e eficientes.                                                                                                                  | Custo moderado de motores novos e eficientes.                                                                                                               | Custo baixo de motores novos e eficientes. |
| Taxa de adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos (INRC)                                            | Baixa adoção de tecnologias. Uso de equipamentos básicos. Certificação mínima.                                                                          | Adoção moderada e seletiva. Adoção de tecnologias básicas (estufa, por exemplo). Certificação parcial.                                                     | Adoção ampla de tecnologias avançadas. Automação e controle precisos. Certificação completa.                                                                |                                            |
| Nível de conscientização e percepção por parte das empresas do setor industrial sobre motores elétricos reconicionados (CPRC)                    | Pouco conhecimento sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados escassos sobre o desempenho dos motores reconicionados. | Conhecimento parcial sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados limitados sobre o desempenho dos motores reconicionados. | Conhecimento técnico sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados confiáveis sobre o desempenho dos motores reconicionados. |                                            |
| Participação de motores elétricos novos de alta eficiência, reconicionados e importados de baixa eficiência no setor industrial no Brasil (MERC) | Novos: 50 %;<br>Reconicionados: 35 %; Importados BQ: 15 %.<br>Sem controle do mercado de reconicionados e importados BQ.                                | Novos: 60 %;<br>Reconicionados: 30 %;<br>Importados BQ: 10 %.<br>Controle razoável do mercado de reconicionados e importados BQ.                           | Novos: 70 %;<br>Reconicionados: 25 %;<br>Importados BQ: 5 %.<br>Controle mais rigoroso do mercado de reconicionados e importados BQ.                        |                                            |
| Preço de energia elétrica no Brasil (PREC)                                                                                                       | Muito baixo                                                                                                                                             | Baixo                                                                                                                                                      | Moderado                                                                                                                                                    | Muito alto                                 |
| Potencial de extensão da vida útil de motores usados (VIDA)                                                                                      | Potencial limitado. 3-5 anos adicionais. Desempenho reduzido.                                                                                           | Potencial moderado com boas práticas. 5-7 anos adicionais. Desempenho mantido. Confiabilidade média.                                                       | Alto potencial com tecnologias avançadas. 8 ou mais anos adicionais - Desempenho mantido. Confiabilidade alta.                                              |                                            |
| Efeito rebote resultante da EE de motores elétricos de uso industrial (REBE)                                                                     | Efeito rebote baixo                                                                                                                                     | Efeito rebote moderado                                                                                                                                     | Efeito rebote alto                                                                                                                                          |                                            |
| Energia conservada (ENCO)                                                                                                                        | 0 – 5 %                                                                                                                                                 | 5 – 10 %                                                                                                                                                   | 10 – 15 %                                                                                                                                                   | 15 – 30 %                                  |

Figura 3.3 – Matriz morfológica genérica para a construção de cenários prospectivos

A segunda etapa concentra-se na redução do espaço morfológico através da introdução de condicionalismos de exclusão e critérios de seleção que filtram combinações incompatíveis ou implausíveis. Certas combinações revelam-se mutuamente excludentes devido a restrições físicas, econômicas ou políticas. Por exemplo, políticas públicas de alta efetividade dificilmente coexistiriam com padrões regulatórios mínimos ou com baixos níveis de inovação tecnológica. Outros condicionalismos derivam de limitações orçamentárias, restrições temporais ou incompatibilidades tecnológicas que tornam determinadas configurações irrealizáveis no horizonte considerado.

O processo de filtragem aplica critérios múltiplos que consideram viabilidade técnica, consistência política, plausibilidade econômica e coerência temporal. Critérios técnicos eliminam combinações que violam princípios físicos ou limitações tecnológicas conhecidas. Critérios políticos excluem configurações incompatíveis com o ambiente institucional brasileiro e as tendências regulatórias internacionais. Critérios econômicos filtram cenários que demandariam investimentos ou transformações estruturais incompatíveis com as capacidades nacionais.

Ao se adotar a matriz morfológica genérica, os cenários prospectivos emergem como combinações específicas que associam uma configuração de cada componente, criando narrativas integradas sobre possíveis futuros do sistema. Esta redução não representa simplificação arbitrária, mas resultado de análise rigorosa que preserva a diversidade essencial de trajetórias evolutivas, eliminando impossibilidades lógicas.

O resultado final constitui conjunto de cenários que cobre adequadamente o campo dos prováveis, oferecendo representação equilibrada de diferentes possibilidades futuras. Cada cenário mantém consistência interna entre suas variáveis constituintes, assegurando que as hipóteses sobre diferentes dimensões do sistema sejam mutuamente compatíveis e plausíveis. Esta abordagem sistemática garante que nenhuma trajetória relevante seja inadvertidamente omitida, enquanto evita a proliferação excessiva de cenários que comprometeria a utilidade analítica do exercício prospectivo.

A metodologia de Zwicky (1969), assim aplicada, proporciona base sólida para a análise quantitativa subsequente através da dinâmica de sistemas, assegurando que os cenários representem adequadamente a diversidade de futuros possíveis para a eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050.

### 3.3.

#### **Módulo de dinâmica de sistemas integrada à perspectiva estratégica**

A dinâmica de sistemas, desenvolvida inicialmente por Forrester (1958; 1961), constitui uma metodologia para compreensão e modelagem de sistemas complexos caracterizados por estruturas de retroalimentação (*feedback*), não-linearidades e atrasos temporais (*delays*). Conforme Sterman (2000), esta abordagem fundamenta-se no princípio de que a estrutura gera comportamento, ou seja, os padrões observados nos sistemas resultam das inter-relações causais entre seus componentes, não de forças externas.

No contexto desta pesquisa, a dinâmica de sistemas deve ser aplicada para quantificar os efeitos rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais em cada cenário prospectivo, capturando as interrelações complexas entre variáveis regulatórias, tecnológicas, econômicas e comportamentais que determinam a magnitude e evolução temporal desses efeitos.

Recomenda-se o emprego do *software* de simulação VenSim ® para desenvolvimento e análise de modelos de dinâmica de sistemas e pensamento sistêmico, incluindo diagramas de laços causais e de estoques e fluxos (Ventana Systems, 2023).

O VenSim ® é um software de simulação desenvolvido pela Ventana Systems, amplamente reconhecido por sua robustez e capacidade de modelar sistemas complexos. Sua principal aplicação está na construção e análise de modelos de feedback dinâmico, permitindo compreender interações não lineares entre variáveis ao longo do tempo. Essa característica é essencial para estudos que envolvem sistemas socioeconômicos, ambientais ou industriais, nos quais as relações de causa e efeito são múltiplas e interdependentes (Ventana Systems, 2023).

Entre os principais diferenciais do Vensim, destaca-se a ênfase na qualidade do modelo, assegurada por ferramentas como a verificação de consistência dimensional e o recurso Reality Check™, que auxilia na validação lógica das equações. Além disso, o software oferece integração com dados reais e métodos avançados de calibração, tornando possível ajustar os parâmetros do modelo para refletir com maior precisão o comportamento observado no sistema real. Essa capacidade é fundamental para pesquisas que exigem rigor científico e confiabilidade nos resultados (Ventana Systems, 2023).

Outro aspecto relevante é a flexibilidade na publicação e distribuição dos modelos, permitindo que pesquisadores compartilhem suas simulações com diferentes públicos, inclusive por meio do Vensim Model Reader, uma versão gratuita para visualização. O

Vensim também incorpora funcionalidades avançadas, como otimização, análise de sensibilidade e simulação de Monte Carlo, que ampliam as possibilidades de exploração dos cenários e avaliação de incertezas. Tais recursos são particularmente úteis em estudos prospectivos, onde a compreensão das variáveis críticas e dos riscos associados é indispensável (Ventana Systems, 2023).

Por fim, a interface intuitiva e os algoritmos de simulação contínua, como o SyntheSim, proporcionam respostas instantâneas às alterações no modelo, favorecendo um processo iterativo de construção e refinamento. Essa abordagem interativa contribui para uma melhor compreensão das dinâmicas envolvidas e para a tomada de decisões mais informadas. Em síntese, o Vensim se apresenta como uma ferramenta poderosa para pesquisadores e profissionais que buscam analisar sistemas complexos e projetar cenários futuros com base em princípios sólidos de dinâmica de sistemas (Ventana Systems, 2023).

### **3.3.1.**

#### **Filosofia e fundamentos da dinâmica de sistemas**

A dinâmica de sistemas baseia-se em cinco conceitos fundamentais que orientam a construção do modelo conceitual. O primeiro conceito é o pensamento sistêmico, que reconhece que o comportamento dos sistemas emerge das interações entre componentes, não das características dos componentes isoladamente (Sterman, 2000, p. 11-12). No contexto dos efeitos rebote de motores elétricos industriais, isto significa que a magnitude do efeito rebote resulta da interação entre eficiência tecnológica, estrutura de custos, políticas públicas e comportamento empresarial, não podendo ser predita apenas pela análise de cada fator separadamente.

O segundo conceito refere-se às estruturas de *feedback*, que constituem as relações causais circulares onde as decisões alteram o estado do sistema, que por sua vez influencia futuras decisões (Sterman, 2000, p. 137-138).

Na aplicação da dinâmica de sistemas no contexto da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil, quando melhorias de eficiência reduzem custos operacionais, as empresas podem aumentar a produção, elevando a demanda energética total, o que pode pressionar preços de energia e influenciar futuras decisões de investimento em eficiência.

O terceiro conceito engloba a não-linearidade, em que pequenas mudanças podem produzir grandes efeitos e vice-versa (Sterman, 2000, p. 21-22). Políticas aparentemente modestas de eficiência energética podem desencadear transformações significativas no

mercado de motores, enquanto políticas ambiciosas podem encontrar resistências que limitam sua efetividade.

O quarto conceito aborda os atrasos temporais (*delays*), que representam o tempo decorrido entre causas e efeitos (Sterman, 2000, p. 409-412). Os efeitos rebote não se manifestam imediatamente após implementação de medidas de eficiência, mas evoluem gradualmente conforme empresas ajustam estratégias operacionais e padrões de investimento.

O quinto conceito trata da dinâmica, enfatizando que o foco da análise deve estar nos padrões de comportamento ao longo do tempo, não em eventos isolados (Sterman, 2000, p. 92-94). Para os efeitos rebote, isto significa analisar trajetórias evolutivas de 2025 a 2050, identificando fases de aceleração, estabilização ou reversão dos efeitos.

### 3.3.2.

#### **Estruturação conceitual do modelo de dinâmica de sistemas**

A estruturação do modelo segue os princípios metodológicos estabelecidos por Sterman (2000), organizando-se em torno de estoques (*stocks*), fluxos (*flows*) e estruturas de retroalimentação que representam as dinâmicas causais do sistema. Esta arquitetura permite capturar tantos aspectos estáticos (estados do sistema em momentos específicos) quanto dinâmicos (taxas de mudança e evolução temporal).

Os estoques principais do modelo incluem o parque instalado de motores elétricos por categoria de eficiência, energia conservada acumulada e efeitos rebote manifestados. Segundo Sterman (2000, p. 191-193), estoques representam acumulações no sistema e fornecem informações sobre o estado atual, influenciando percepções e decisões dos agentes. O estoque de motores de alta eficiência, por exemplo, determina tanto o potencial de conservação energética quanto a capacidade instalada que pode gerar efeitos rebote.

Os fluxos modelam as taxas de substituição de motores elétricos induzindo adoção de tecnologias eficientes, conservação de energia e manifestação de efeitos rebote. Conforme Sterman (2000, p. 194-196), fluxos representam atividades e são as únicas variáveis que podem alterar estoques. A taxa de adoção de motores eficientes, por exemplo, é influenciada por políticas públicas, custos relativos e conscientização empresarial, determinando a velocidade de transformação do parque instalado.

As estruturas de retroalimentação capturam como os resultados do sistema influenciam decisões futuras dos agentes, criando loops de reforço (*reinforcing loops*) ou equilíbrio (*balancing loops*) que determinam o comportamento dinâmico do conjunto

(Stermann, 2000, p. 137-142). *Loops* de reforço amplificam tendências existentes, enquanto loops de equilíbrio promovem estabilidade através de mecanismos autocorretivos.

### **3.3.3.**

#### **Identificação dos estoques fundamentais**

O modelo estrutura-se em torno de quatro categorias principais de estoques que capturam a dinâmica completa do sistema de motores elétricos industriais no Brasil.

O primeiro estoque refere-se ao mercado dos motores elétricos (*MERC*) por categoria de eficiência, desagregados em motores novos de alta eficiência (*MN*), motores importados de baixa qualidade (*MI*), motores em operação no parque instalado (*MO*) e motores reconicionados (*MR*). Esta desagregação permite capturar diferenças significativas nos padrões de consumo energético e potencial de geração de efeitos rebote entre as categorias, conforme identificado na caracterização setorial.

O segundo estoque compreende a energia conservada acumulada, que representa o somatório dos ganhos de eficiência energética alcançados desde o início do período de análise. Este estoque constitui indicador fundamental para avaliação da efetividade das políticas de eficiência energética e base para cálculo dos efeitos rebote relativos.

O terceiro estoque engloba os efeitos rebote manifestados por categoria (direto, indireto, macroeconômico e comportamental), permitindo análise detalhada dos mecanismos específicos que reduzem a efetividade das políticas de eficiência. A desagregação por categoria facilita identificação de políticas de mitigação direcionadas.

O quarto estoque abrange as capacidades institucionais de regulação e fiscalização, que evoluem gradualmente através de investimentos em recursos humanos, sistemas de monitoramento e marcos regulatórios. Este estoque influencia a efetividade de implementação das políticas públicas e capacidade de controle dos efeitos rebote.

### **3.3.4.**

#### **Especificação dos fluxos principais**

Os fluxos do modelo representam as taxas de mudança que conectam os estoques e determinam a evolução temporal do sistema. A especificação adequada destes fluxos constitui elemento crítico para capturar as dinâmicas reais do sistema de motores elétricos industriais.

O fluxo de adoção de motores elétricos industriais eficientes é determinado pela interação entre fatores econômicos (custos relativos, preços de energia), regulatórios

(padrões mínimos de eficiência, fiscalização) e tecnológicos (disponibilidade, qualidade). Este fluxo alimenta o estoque de motores de alta eficiência e é influenciado por atrasos temporais relacionados a ciclos de investimento empresarial e difusão tecnológica.

O fluxo de conservação energética resulta da diferença entre consumo teórico (baseado em tecnologias antigas) e consumo real (com tecnologias eficientes). Este fluxo é reduzido pelos efeitos rebote que convertem parte dos ganhos de eficiência em aumento de consumo através de intensificação do uso, expansão da produção ou realocação de recursos.

O fluxo de manifestação de efeitos rebote é determinado por elasticidades econômicas, fatores comportamentais e condições macroeconômicas. Segundo a literatura (Greening et al., 2000), este fluxo varia significativamente entre setores e contextos, sendo influenciado por estruturas de mercado, níveis de renda e percepções sobre sustentabilidade.

O fluxo de desenvolvimento de capacidades institucionais resulta de investimentos públicos em regulação, fiscalização e monitoramento. Este fluxo apresenta características de delay temporal significativo, pois o desenvolvimento de capacidades regulatórias requer tempo para consolidação e efetividade.

### **3.3.5.**

#### **Mapeamento das estruturas de retroalimentação**

O comportamento dinâmico do sistema de motores elétricos industriais resulta da interação entre múltiplas estruturas de retroalimentação que conectam eficiência energética, custos, produção, políticas públicas e efeitos rebote. O mapeamento sistemático destas estruturas é fundamental para compreender os mecanismos que geram ou atenuam os efeitos rebote.

A primeira estrutura de retroalimentação constitui um *loop* de reforço entre eficiência energética e competitividade empresarial. Quando empresas adotam motores mais eficientes, reduzem custos operacionais, aumentam competitividade, expandem produção e demandam mais equipamentos eficientes. Este *loop* pode intensificar efeitos rebote diretos através do aumento da escala de operação.

A segunda estrutura representa um *loop* de equilíbrio entre efeitos rebote e políticas públicas. Quando efeitos rebote reduzem a efetividade das políticas de eficiência energética, criam pressões para aprimoramento regulatório, desenvolvimento de instrumentos complementares e maior fiscalização, que podem reduzir futuros efeitos

rebote.

A terceira estrutura configura um *loop* de reforço entre inovação tecnológica e adoção de motores eficientes. Maior adoção estimula investimentos em pesquisa e desenvolvimento, reduz custos através de economias de escala, facilita difusão tecnológica e promove maior adoção. Este loop pode acelerar transformações no parque instalado.

A quarta estrutura estabelece um *loop* de equilíbrio entre preços de energia e demanda por eficiência. Quando efeitos rebote aumentam consumo energético total, podem pressionar preços de energia, aumentar incentivos econômicos para eficiência e estimular maior adoção de tecnologias eficientes.

### 3.3.6.

#### **Parametrização baseada em cenários prospectivos**

A integração entre prospectiva estratégica e dinâmica de sistemas operacionaliza-se através da parametrização diferenciada do modelo quantitativo com base nas hipóteses qualitativas de cada cenário. As matrizes morfológicas descritas no Capítulo 4 (Subseção 4.1.6) fornecem valores e intervalos para os parâmetros-chave do modelo, enquanto as narrativas dos cenários prospectivos orientam a especificação das relações funcionais entre variáveis.

Esta parametrização diferenciada permite que o mesmo modelo estrutural represente dinâmicas distintas conforme o contexto de cada cenário, conferindo flexibilidade analítica sem comprometer o rigor metodológico. Essa abordagem sistêmica híbrida evita a necessidade de desenvolver modelos separados para cada cenário, assegurando comparabilidade dos resultados.

Os parâmetros críticos incluem taxas de adoção tecnológica, que variam conforme a efetividade das políticas públicas e estrutura de custos de cada cenário.

As elasticidades de resposta a preços de energia diferem entre cenários conforme o nível de preços e estrutura de mercado.

A efetividade de políticas públicas é parametrizada através de fatores multiplicativos que ajustam a influência de cada instrumento de política. Estes fatores refletem não apenas a ambição das políticas, mas também a capacidade institucional de implementação e fiscalização.

A propensão a efeitos rebote em diferentes contextos é parametrizada através de funções que relacionam ganhos de eficiência com diferentes tipos de efeito rebote (direto,

indireto, macroeconômico e comportamental). Estas funções incorporam características setoriais específicas identificadas na literatura nacional e internacional.

### 3.3.7.

#### Especificação das equações estruturais do modelo

O modelo de dinâmica de sistemas traduz as relações causais identificadas nas estruturas de retroalimentação em equações matemáticas que permitem simulação quantitativa. As equações fundamentais do modelo estabelecem a arquitetura matemática que conecta os cenários prospectivos qualitativos às projeções quantitativas de efeitos rebote.

A análise prospectiva das variáveis macroeconômicas ( $Ma$ ) envolve a definição e a estimativa dessas variáveis ao longo do horizonte temporal ( $t_i$ ), previamente estabelecido para o cenário macroeconômico em questão. Inicialmente, identificam-se as variáveis macroeconômicas mais relevantes, selecionando-se aquelas que apresentam maior correlação com o número de motores ( $MERC$ ). Em seguida, procede-se à estimativa dessas variáveis para o horizonte  $t_i$ , considerando tanto a dimensão do número dos motores quanto o cenário macroeconômico adotado.

Para aprimorar a correlação entre o tamanho de  $MERC$  e as variáveis macroeconômicas, pode-se delimitar a série histórica, utilizando dados mais recentes. Nesse contexto, a variável temporal  $t_1$  representa o primeiro ponto da série histórica, enquanto  $t_n$  corresponde ao último ponto ( $t_1, t_2, \dots, t_n$ ).

A partir dos dados históricos coletados e da análise prospectiva da população e das variáveis macroeconômicas ( $Ma$ ), desenvolve-se um modelo econométrico para estimar o tamanho de  $MERC$ . Esse modelo baseia-se em uma análise de regressão entre número de motores ( $MERC$ ), e as variáveis macroeconômicas ( $Ma$ ). A Equação 1 representa essa relação.

$$MERC(t) = f(Ma) \quad (3)$$

A regressão linear pode ser realizada utilizando o software Microsoft Excel, que permite a aplicação de testes estatísticos para validação do modelo, tais como verificação de correlação, análise de variância e teste t para os coeficientes de regressão. Uma vez validado, o modelo é utilizado para estimar a quantidade de motores ( $MERC$ ) correspondente a cada cenário macroeconômico, conforme estabelecido pela Equação 1. Assim, a estimativa da quantidade de motores ( $MERC$ ), associada ao cenário macroeconômico ( $Ma$ ) dentro do horizonte temporal definido ( $t_i$ ), pode ser obtida por

meio da Equação 2, derivada do modelo de regressão previamente ajustado.

$$MERC(t_i) = f(Ma(t_i)) \quad (4)$$

Nesse contexto, o horizonte temporal é representado por  $i = n + 1, n + 2, \dots, n + k$ , em que  $k$  corresponde à duração total do período prospectivo considerado. Essa formulação permite projetar a quantidade de motores ( $MERC$ ) ao longo do tempo, com base nas variáveis macroeconômicas selecionadas e no modelo de regressão previamente validado.

Primeiramente, definem-se os grupos de motores que compõem o mercado ( $MERC_{LB}$ ): motores novos ( $MN_{LB}$ ), motores em operação ( $MO_{LB}$ ), motores importados de baixa qualidade ( $MI_{LB}$ ) e motores reconicionados ( $MR_{LB}$ ). Em seguida, atribuem-se os percentuais de participação de cada grupo ( $\%_{MN}, \%_{MO}, \%_{MI}, \%_{MR}$ ) com base em na quantidade de unidades em operação no ano de referência. Calculam-se os valores percentuais proporcionalmente ao total de motores em atividade no setor.

Para determinar o consumo médio de cada categoria de motor  $CM_{MN_{LB}}, CM_{MI_{LB}}, CM_{MO_{LB}}, CM_{MR_{LB}}$ , utilizam-se os dados específicos de consumo energético de cada grupo. Inicialmente, identifica-se o consumo total anual associado a cada tipo de motor e o número de unidades em operação no período de referência. Calcula-se o consumo médio por unidade dividindo-se o consumo total ( $EC_{Mk}(t)$ ) pelo número de motores ( $Mk(t)$ ) correspondentes (Equação 3).

$$CM_{Mk} = \frac{EC_{Mk}(t)}{Mk(t)} \quad (5)$$

Onde,  $k$  = ao tipo de motor.

### **Determinação da linha de base**

A determinação da linha de base constitui elemento fundamental para a estimativa dos efeitos rebote em cada cenário prospectivo. A linha de base representa a evolução natural do mercado de motores elétricos industriais no Brasil na ausência de intervenções políticas ou avanços tecnológicos significativos.

O mercado total de motores ( $MERC_{LB}$ ) na linha de base é determinado pela agregação das quatro categorias identificadas na análise setorial: motores novos ( $MN_{LB}$ ), motores importados de baixa qualidade ( $MI_{LB}$ ), motores em operação ( $MO_{LB}$ ) e motores reconicionados  $MR_{LB}$ . Esta formulação permite capturar a dinâmica completa do

ecossistema de motores elétricos industriais brasileiros e pode ser vista a Equação 4, a seguir:

$$MERC_{LB}(t) = MN_{LB}(t) + MI_{LB}(t) + MO_{LB}(t) + MR_{LB}(t) \quad (6)$$

O consumo energético total ( $EC_{LB}$ ) na linha de base é calculado através da soma ponderada do consumo de cada categoria de motor, multiplicando-se a quantidade de motores de cada tipo pelo respectivo consumo médio específico ( $CM$ ), conforme Equação 5. Este consumo médio por tipo de motor deve ser determinado através de levantamento de dados constantes da literatura ou estudos de mercado realizados por tomadores de decisão. Esta abordagem reconhece as diferenças significativas nos padrões de consumo energético entre as diferentes categorias de motores, conforme identificado por Vieira (2018).

$$EC_{LB}(t) = MN_{LB}(t).CM_{MN_{LB}} + MI_{LB}(t).CM_{MI_{LB}} + MO_{LB}(t).CM_{MO_{LB}} + MR_{LB}(t).CM_{MR_{LB}} \quad (7)$$

### **Estimativa dos efeitos rebote nos cenários prospectivos**

Os cenários prospectivos ( $cn$ ) consideram ambientes com diferentes níveis de efetividade das políticas públicas e fiscalização, caracterizados por mudanças nas dinâmicas de mercado. O mercado total de motores ( $MERC_{cn}$ ) mantém a mesma estrutura agregativa da linha de base, porém com parâmetros ajustados pelos fatores de influência específicos de cada cenário como apresentado na Equação 6, a seguir:

$$MERC_{cn}(t) = MN_{cn}(t) + MI_{cn}(t) + MO_{cn}(t) + MR_{cn}(t) \quad (8)$$

A demanda por motores novos ( $MN_{cn}$ ), expressa pela Equação 7, é influenciada pelos fatores relacionados ao custo comparativo entre diferentes tecnologias ( $F\_CUST_{cn}$ ) e ao preço da energia elétrica ( $F\_PREC_{cn}$ ). O incremento na adoção de motores novos reflete a sensibilidade do mercado a estes dois determinantes econômicos fundamentais.

$$MN_{cn}(t) = MN_{LB}(t). (1 + F\_CUST_{cn}(t) + F\_PREC_{cn}(t)) \quad (9)$$

A quantidade de motores importados de baixa qualidade ( $MI_{cn}$ ) é determinada através de uma redistribuição proporcional do espaço de mercado remanescente, após a alocação dos motores novos e em operação, conforme Equação 8. Esta formulação reflete a competição entre motores importados e reconicionados pelo mesmo segmento de mercado.

$$MI_{Cn}(t) = \frac{MI_{LB}(t)}{MI_{LB}(t) + MR_{LB}(t)} \cdot (MERC_{LB}(t) - MN_{Cn}(t) - MO_{Cn}(t)) \quad (10)$$

O estoque de motores em operação ( $MO_{Cn}$ ) permanece constante em relação à linha de base, representando o parque industrial instalado que evolui principalmente através de melhorias operacionais e de manutenção, como pode ser visto na Equação 9 a seguir:

$$MO_{Cn}(t) = MO_{LB}(t) \quad (11)$$

Analogamente aos motores importados, a quantidade de motores reconicionados ( $MR_{Cn}$ ) é calculada mediante redistribuição proporcional do mercado remanescente, estabelecendo uma dinâmica competitiva com os motores importados de baixa qualidade (Equação 10).

$$MR_{Cn}(t) = \frac{MR_{LB}(t)}{MI_{LB}(t) + MR_{LB}(t)} \cdot (MERC_{LB}(t) - MN_{Cn}(t) - MO_{Cn}(t)) \quad (12)$$

O consumo médio dos motores novos ( $CM_{MN_{Cn}}$ ) incorpora dois efeitos contrapostos: a redução devido aos padrões mínimos de eficiência energética ( $F_{MEPS_{Cn}}$ ) e o aumento decorrente do efeito rebote ( $F_{REBE_{Cn}}$ ). A Equação 11 captura a tensão fundamental entre ganhos de eficiência e intensificação do uso.

$$CM_{MN_{Cn}}(t) = CM_{MN_{LB}}(t) \cdot (1 - F_{MEPS_{Cn}}(t)) \cdot (1 + F_{REBE_{Cn}}(t)) \quad (13)$$

O consumo dos motores importados de baixa qualidade ( $CM_{MI_{Cn}}$ ) permanece inalterado em relação à linha de base, refletindo a ausência de melhorias tecnológicas ou regulatórias nesta categoria (Equação 12):

$$CM_{MI_{Cn}}(t) = CM_{MI_{LB}}(t) \quad (14)$$

O consumo dos motores em operação ( $CM_{MO_{Cn}}$ ) é reduzido pela influência conjunta da maior conscientização sobre motores reconicionados ( $F_{CPRC_{Cn}}$ ) e das inovações no setor de recondicionamento ( $F_{INRC_{Cn}}$ ). Estes fatores promovem melhorias operacionais no parque instalado, conforme pode ser visto na Equação 13.

$$CM_{MO_{Cn}}(t) = CM_{MO_{LB}}(t) \cdot (1 - F_{CPRC_{Cn}}(t) - F_{INRC_{Cn}}(t)) \quad (15)$$

O consumo dos motores reconicionados ( $CM_{MR_{Cn}}$ ) é influenciado exclusivamente pelas inovações tecnológicas no processo de reconicionamento ( $F\_INRC_{Cn}$ ), refletindo melhorias na qualidade e eficiência destes equipamentos (Equação 14).

$$CM_{MR_{Cn}}(t) = CM_{MR_{LB}}(t) \cdot (1 - F\_INRC_{Cn}(t)) \quad (16)$$

Conforme Equação 15, o consumo energético total do cenário  $n$  ( $EC_{Cn}$ ) mantém a mesma estrutura de agregação da linha de base, porém incorporando os consumos médios ajustados pelos fatores de influência específicos:

$$EC_{Cn}(t) = MN_{Cn}(t) \cdot CM_{MN_{Cn}}(t) + MI_{Cn}(t) \cdot CM_{MI_{Cn}}(t) + MO_{Cn}(t) \cdot CM_{MO_{Cn}}(t) + MR_{Cn}(t) \cdot CM_{MR_{Cn}}(t) \quad (17)$$

Por fim, a energia conservada no cenário  $n$  ( $ENCO_{Cn}$ ) representa o indicador-chave de desempenho do cenário, calculada como a diferença entre o consumo da linha de base e o consumo efetivo do cenário (Equação 16). Valores positivos indicam economia energética líquida, enquanto valores negativos sinalizam aumento do consumo devido a efeitos rebote ou outras dinâmicas sistêmicas.

$$ENCO_{Cn}(t) = EC_{LB}(t) - EC_{Cn}(t) \quad (18)$$

A partir da energia conservada  $ENCO_{Cn}(t)$  e consumo energético da linha de base  $EC_{LB}(t)$ , e considerando os valores projetados de conservação de energia para cada cenário prospectivo analisado ( $\%ENCO_{Cn}$ ), torna-se possível estimar o efeito rebote associado a cada um deles utilizando a equação 17. Essa abordagem permite avaliar em que medida os ganhos de eficiência energética são compensados, parcial ou totalmente, por aumentos no consumo decorrentes de mudanças comportamentais ou operacionais induzidas pela própria melhoria tecnológica.

$$ER_{Cn}(t) = \left( \left( 1 - \frac{ENCO_{Cn}(t)}{(EC_{LB}(t) \cdot \%ENCO_{Cn})} \right) \cdot 100 \right) - 100 \quad (19)$$

### 3.3.8.

#### Formulação dos atrasos temporais e ajustes não-lineares

Os atrasos temporais (*delays*) constituem características fundamentais dos sistemas reais que devem ser adequadamente representados no modelo. Conforme Sterman (2000,

p. 409-432), existem diferentes tipos de atrasos que afetam distintamente o comportamento dos sistemas.

O atraso material (*material delay*) representa o tempo necessário para transformação física dos estoques. No contexto dos motores elétricos, este atraso corresponde ao tempo de substituição do parque instalado, que varia entre 15-20 anos conforme a vida útil dos equipamentos. Este atraso é modelado através de estruturas de envelhecimento (*aging chains*) que representam a distribuição temporal das substituições.

O atraso informacional (*information delay*) refere-se ao tempo necessário para que informações sobre mudanças no sistema sejam percebidas e processadas pelos agentes. Para políticas de eficiência energética, este atraso inclui o tempo necessário para que empresas reconheçam mudanças regulatórias, avaliem opções tecnológicas e tomem decisões de investimento.

O atraso de percepção (*perception delay*) representa o tempo para que mudanças sejam incorporadas às expectativas e estratégias dos agentes. Os efeitos rebote frequentemente emergem após períodos de adaptação, quando empresas ajustam operações para aproveitar ganhos de eficiência.

Os ajustes não-lineares capturam situações em que a resposta dos agentes não é proporcional aos estímulos. Por exemplo, a adoção de motores eficientes pode apresentar efeitos de limiar (*threshold effects*), onde pequenas mudanças nos incentivos produzem grandes mudanças na adoção após ultrapassar pontos críticos.

### **3.3.9.**

#### **Validação e calibração do modelo**

A validação do modelo de dinâmica de sistemas segue protocolos estabelecidos por Sterman (2000, p. 859-930), incluindo múltiplas dimensões de teste que asseguram correspondência adequada entre modelo e sistema real.

A validação estrutural verifica se a estrutura do modelo corresponde à estrutura do sistema real através de consulta a especialistas setoriais e análise da literatura técnica. Este processo confirma que as relações causais modeladas refletem mecanismos reais identificados na análise empírica dos efeitos rebote.

A validação comportamental testa se o modelo reproduz padrões de comportamento observados em dados históricos quando disponíveis. Para o contexto brasileiro, utilizam-se dados de evolução do parque de motores elétricos e indicadores de intensidade energética industrial para validar trajetórias de referência.

A validação de sensibilidade avalia se os resultados principais são robustos a variações nos parâmetros e hipóteses do modelo. Este teste identifica parâmetros críticos que requerem maior precisão na estimação e confirma que diferenças entre cenários refletem mudanças estruturais significativas.

A validação de políticas (*policy space*) examina se o modelo responde adequadamente a diferentes intervenções de política, produzindo resultados qualitativamente consistentes com expectativas teóricas e evidências empíricas da literatura.

### **3.3.10.**

#### **Simulação e análise de resultados segundo a abordagem sistêmica híbrida**

A simulação do modelo é realizada para cada cenário prospectivo (*cn*), gerando trajetórias quantitativas para as variáveis-chave de interesse no horizonte 2025-2050. O processo de simulação utiliza métodos de integração numérica que asseguram estabilidade e precisão dos resultados ao longo do período de análise.

Os resultados principais incluem energia conservada por categoria de motor, efeitos rebote por tipo (direto, indireto, macroeconômico e comportamental), efetividade líquida das políticas de eficiência energética e evolução temporal do parque instalado. Estas métricas permitem avaliação abrangente do desempenho de cada cenário.

A análise de resultados combina interpretação quantitativa (magnitudes, tendências e padrões temporais) com explicação qualitativa baseada nas narrativas de cenário e estruturas de retroalimentação identificadas. Esta síntese permite compreender não apenas "quanto", mas "por que" os efeitos rebote se manifestam diferentemente em cada contexto.

A decomposição dos efeitos rebote por categoria permite identificação dos mecanismos específicos que contribuem para redução da efetividade das políticas. Esta análise orienta o desenvolvimento de estratégias de mitigação direcionadas aos mecanismos mais relevantes em cada cenário.

A análise de sensibilidade identifica parâmetros e hipóteses que exercem maior influência sobre os resultados, orientando esforços de refinamento do modelo e coleta de dados adicionais. Esta análise também avalia a robustez das recomendações de política a incertezas paramétricas.

A síntese integrada conecta os resultados quantitativos às implicações para políticas públicas, considerando não apenas efetividade técnica, mas também viabilidade política,

custos de implementação e aceitação social das medidas propostas. Esta análise multidimensional subsidia recomendações mais fundamentadas e implementáveis para formuladores de políticas públicas brasileiras.

### 3.4.

#### **Considerações finais sobre o capítulo**

O modelo conceitual proposto representa uma contribuição metodológica original ao campo de estudos sobre eficiência energética e efeitos rebote, integrando de forma sistemática abordagens tradicionalmente empregadas de maneira isolada. A combinação entre prospectiva estratégica e dinâmica de sistemas permite capturar tanto a incerteza fundamental sobre o futuro, quanto as complexidades dinâmicas dos sistemas energético-industriais.

A originalidade da abordagem reside na operacionalização efetiva da integração metodológica, superando limitações identificadas na literatura através de protocolos específicos de tradução entre dimensões qualitativas e quantitativas. Esta integração possibilita análises mais robustas e realistas dos efeitos rebote, considerando simultaneamente múltiplos futuros possíveis e as dinâmicas causais que os produzem.

Particularmente relevante neste contexto é o desenvolvimento de três componentes metodológicos principais que distinguem esta pesquisa de abordagens convencionais empregadas em estudos prévios (Quadro 2.1). O primeiro deles consiste na interface de integração que estabelece protocolos sistemáticos para tradução bidirecional entre resultados qualitativos (*foresight*) e parâmetros quantitativos, eliminando a dicotomia tradicional entre análises prospectivas e modelagem dinâmica de sistemas. Complementarmente, a parametrização diferenciada por cenário prospectivo permite que um mesmo modelo estrutural represente contextos radicalmente distintos, conferindo flexibilidade analítica sem comprometer rigor metodológico. Finalmente, a incorporação explícita de *delays* e estruturas de *feedback* específicas para efeitos rebote oferece representação mais realista desses fenômenos em comparação com abordagens estáticas predominantes na literatura.

Fundamental para a credibilidade científica dos resultados, a robustez metodológica do modelo pode ser assegurada através de múltiplas estratégias de validação. A validação estrutural confirma correspondência adequada entre a arquitetura do modelo e o sistema real através de consulta sistemática a especialistas setoriais e à literatura especializada, incluindo publicações do referencial normativo.

Paralelamente, a validação comportamental pode demonstrar a capacidade do modelo reproduzir padrões históricos conhecidos, quando alimentado com dados empíricos disponíveis. Adicionalmente, a validação de sensibilidade permite evidenciar a estabilidade dos resultados principais a variações paramétricas moderadas, confirmando que as diferenças entre cenários refletem mudanças estruturais significativas e não artefatos de calibração.

Transcendendo aspectos puramente metodológicos, o modelo contribui para o avanço da compreensão de sistemas complexos ao demonstrar como incertezas fundamentais sobre o futuro podem ser sistematicamente incorporadas em análises dinâmicas rigorosas. Esta contribuição estende sua relevância para campos além da eficiência energética de motores elétricos industriais, incluindo estudos de transições sociotécnicas e governança de recursos naturais, nos quais a interação entre múltiplos futuros possíveis e dinâmicas causais complexas constitui desafio analítico central.

Do ponto de vista aplicado, para o planejamento energético brasileiro, o modelo oferece instrumentos conceituais e operacionais para incorporação sistemática da análise de efeitos rebote nas projeções oficiais de demanda e na avaliação *ex-ante* de políticas públicas. A capacidade de simular diferentes contextos institucionais e tecnológicos permite aos formuladores de políticas anteciparem consequências não intencionais e aperfeiçoarem a concepção e escopo de intervenções, contribuindo para maior efetividade do planejamento setorial de longo prazo.

Considerando perspectivas de replicação internacional, a arquitetura metodológica desenvolvida foi estruturada para maximizar transferibilidade, especialmente para aplicações em economias emergentes com características similares ao Brasil. Os protocolos de parametrização podem ser adaptados para diferentes contextos regulatórios, estruturas industriais e capacidades tecnológicas nacionais. Neste sentido, a experiência de aplicação a motores elétricos industriais fornece template replicável para extensão a outras tecnologias de eficiência energética, desde sistemas de iluminação até processos industriais específicos.

Reconhecendo limitações inerentes a qualquer modelagem, embora robusto, o modelo apresenta aspectos que oferecem oportunidades para desenvolvimentos futuros. A representação agregada de comportamentos microeconômicos pode ser refinada através de integração com modelos baseados em agentes. Simultaneamente, a incorporação de variabilidades regionais e setoriais pode ampliar realismo das projeções. Ademais, a integração com modelos macroeconômicos pode capturar efeitos rebote de escala ainda mais ampla. Estas extensões representam agenda promissora para pesquisas subsequentes.

Finalmente, no contexto das metas brasileiras de neutralidade climática, o modelo oferece ferramentas essenciais para avaliação realista do papel da eficiência energética industrial na descarbonização. A capacidade de quantificar *trade-offs* entre diferentes estratégias de políticas públicas permite otimização de recursos limitados e minimização de impactos ambientais líquidos. Esta contribuição é particularmente relevante considerando pressões crescentes por demonstração de progresso efetivo em direção às metas climáticas assumidas internacionalmente.

Embora aplicado especificamente ao caso dos motores elétricos industriais brasileiros, a arquitetura metodológica desenvolvida possui caráter genérico e transferível, constituindo um modelo replicável e adaptável a outras tecnologias de eficiência energética e distintos contextos geográficos e setoriais. Desta forma, a contribuição metodológica desta pesquisa transcende o escopo específico do objeto de estudo, ampliando significativamente as possibilidades de análise sistêmica e projeção estratégica de longo prazo no campo da eficiência energética industrial, com potencial de influenciar tanto práticas acadêmicas, quanto políticas públicas em escala nacional.

## 4

### **Validação empírica do modelo conceitual**

Neste capítulo, apresentam-se os resultados da validação empírica do modelo conceitual estruturado em três componentes principais: (i) módulo de prospectiva estratégica para construção de cenários futuros consistentes; (ii) módulo de dinâmica de sistemas para modelagem quantitativa das interrelações complexas entre variáveis do sistema energético-industrial; e (iii) interface de integração que permite a síntese analítica entre os componentes qualitativos e quantitativos do modelo.

#### **4.1.**

#### **Resultados do módulo de prospectiva estratégica para construção de cenários futuros**

A aplicação empírica do módulo de prospectiva estratégica descrita no capítulo anterior produziu resultados abrangentes que fundamentam a construção de cenários futuros consistentes para a eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050.

Os resultados demonstram a operacionalização efetiva da metodologia de Godet (1993; 2000), gerando insumos qualitativos estruturados que orientam a parametrização subsequente do modelo de dinâmica de sistemas.

A caracterização da situação atual evidenciou um contexto de transição, marcado por avanços tecnológicos significativos em paralelo a lacunas regulatórias que comprometem a efetividade das políticas vigentes. A identificação dos condicionantes futuros destacou cinco forças estruturais - evolução regulatória, avanços tecnológicos, pressões econômicas, digitalização industrial e transição energética - que convergem para reconfigurar o sistema até 2050. Finalmente, a geração de quatro cenários prospectivos baseados em matrizes morfológicas resultou em trajetórias alternativas que capturam desde contextos de estagnação regulatória com efeitos rebote mínimos (6 %) até situações de modernização acelerada com efeitos rebote intensos (85 %), fornecendo a base estrutural para a modelagem quantitativa subsequente e demonstrando a amplitude de futuros

possíveis que emergem de diferentes configurações político-institucionais.

#### **4.1.1.**

##### **Definição das questões norteadoras e horizonte temporal**

As seguintes questões norteadoras foram definidas à luz das lacunas de pesquisa identificadas durante a revisão da literatura e do interesse na continuidade de estudos prévios sobre eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil (Vieira, 2018; Fortes et al., 2020, por exemplo), que ainda não haviam contemplado a quantificação de efeitos rebote em seus escopos:

- Como evoluirá a implementação de políticas públicas e estratégias de eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil até o horizonte de 2050?
- Qual o impacto potencial do aumento da eficiência energética de motores elétricos de uso industrial na redução do consumo de energia no país?
- Qual o potencial da ocorrência de efeitos rebote associados à implementação de políticas públicas e estratégias de eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil no horizonte temporal considerado?
- Que medidas mitigadoras dos potenciais efeitos rebote do aumento da eficiência energética nesse contexto e quais recomendações deverão ser propostas para formulação de políticas públicas integradas e estratégias de eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil?

O horizonte temporal definido é 2050 em alinhamento ao horizonte estabelecido no Plano Nacional de Energia 2050 (Brasil, 2020).

O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050) destaca a importância de diversificar a matriz energética brasileira, incentivando a expansão de fontes renováveis, como solar, eólica e biomassa, além de aprimorar a eficiência energética em diversos setores da economia. Essa diversificação busca reduzir a dependência de fontes fósseis e minimizar as emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se aos compromissos internacionais de mitigação das mudanças climáticas (Brasil, 2020).

De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia 2034 (PDE 2034) o consumo final de energia no Brasil atingirá 329,3 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) até 2034, com uma taxa média de crescimento anual de 2,0 %.

Para atender a essa demanda, a Oferta Interna de Energia (OIE) deverá crescer a uma taxa média de 2,2 % ao ano, alcançando aproximadamente 394,3 milhões de tep em 2034. A geração de energia elétrica, por sua vez, está projetada para crescer a uma taxa média de 3,3 % ao ano, totalizando 1045,3 terawatts-hora (TWh) em 2034 (Brasil, 2024).

O Relatório de Análise Socioambiental das Fontes Energéticas que integra o do PDE 2034 enfatiza a necessidade de avaliar os impactos ambientais e sociais das diferentes fontes de energia. A título de ilustração, a expansão da energia solar fotovoltaica centralizada requer atenção especial ao uso do solo e à gestão de resíduos, como painéis fotovoltaicos ao final de sua vida útil. A adoção de práticas de economia circular e a consideração antecipada do descomissionamento são essenciais para mitigar possíveis impactos (EPE, 2024b).

O cenário econômico projetado para o período de 2024 a 2034 indica um crescimento contínuo do Produto Interno Bruto (PIB) e da população brasileira, o que implicará em um aumento da demanda por energia (EPE, 2025). Para suprir essa demanda e assegurar a expansão sustentável do setor energético, serão necessários investimentos significativos em infraestrutura, tecnologia e capacitação (EPE, 2025). O PDE 2034 estima os investimentos necessários para a expansão da matriz energética brasileira, destacando a importância de políticas públicas eficazes e de um ambiente regulatório estável para atrair capital privado e fomentar parcerias público-privadas (Brasil, 2024).

O Caderno ‘Ações Norteadoras para o Avanço da Eficiência Energética no Brasil’ ressalta a eficiência energética como um componente crucial para a sustentabilidade do setor. Implementar medidas de eficiência energética pode reduzir a necessidade de investimentos em nova capacidade de geração, diminuir custos para consumidores e mitigar impactos ambientais. As ações propostas incluem a modernização de equipamentos, aprimoramento de processos industriais, promoção de edificações eficientes e conscientização dos consumidores sobre o uso racional de energia (EPE, 2024a).

Esses referenciais normativos constituem a base estruturante para a geração dos cenários prospectivos e para a formulação das questões norteadoras da validação empírica do modelo conceitual, fornecendo diretrizes oficiais que orientam a expansão do setor energético brasileiro e destacam a relevância da eficiência energética como eixo estratégico de longo prazo.

#### 4.1.2.

#### Definição e classificação das variáveis-chave: uso da análise estrutural

Para classificar as variáveis-chave definidas no Capítulo 3, aplicou-se o método de análise estrutural, utilizando-se a ferramenta computacional MICMAC® (LIPSOR, 2025). Este método compreende as seguintes etapas: (i) identificação e descrição das variáveis-chave; (ii) análise das relações e causa-e-efeito entre as variáveis-chave; (iii) classificação das variáveis-chave de acordo com a influência e dependência entre elas; e (iv) elaboração do diagrama de influência-dependência indireta resultante da análise estrutural.

Nesta pesquisa, foram realizadas duas reuniões com a participação de especialistas nesta temática: (i) a primeira para o recenseamento das variáveis-chave a serem cenarizadas; e (ii) a segunda para a análise estrutural das variáveis-chave, conforme descrito a seguir. Como resultado da primeira reunião, definiu-se um conjunto de onze variáveis-chave, conforme apresentado no Quadro 3.1 (Capítulo 3). Na segunda reunião, a matriz 11 x 11 foi preenchida pelos especialistas da seguinte forma. Para cada par de variáveis, foi feita a seguinte pergunta: “Existe uma influência direta da variável i sobre a variável j?”

Caso nenhuma influência direta fosse identificada, atribuía-se o valor “0”. Quando houvesse influência, esta era classificada em três níveis: fraca “1”, moderada “2” ou forte “3”.

Esse processo resultou em uma matriz de influência direta entre as variáveis-chave (Figura 4.1).

|           | 1 : PEEE | 2 : MEPS | 3 : INOV | 4 : CUST | 5 : INRC | 6 : CPRC | 7 : MERC | 8 : PREC | 9 : VIDA | 10 : REBE | 11 : ENCO |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 1 : PEEE  | 0        | 3        | 1        | 3        | 1        | 2        | 3        | 0        | 0        | 2         | 2         |
| 2 : MEPS  | 0        | 0        | 2        | 3        | 2        | 2        | 3        | 0        | 2        | 2         | 3         |
| 3 : INOV  | 0        | 1        | 0        | 2        | 2        | 0        | 2        | 1        | 2        | 1         | 1         |
| 4 : CUST  | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        | 3        | 3        | 1        | 0        | 3         | 2         |
| 5 : INRC  | 0        | 0        | 0        | 2        | 0        | 2        | 2        | 0        | 2        | 2         | 2         |
| 6 : CPRC  | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 0        | 1        | 1        | 1        | 2         | 2         |
| 7 : MERC  | 0        | 0        | 1        | 2        | 3        | 1        | 0        | 1        | 1        | 3         | 3         |
| 8 : PREC  | 1        | 0        | 0        | 3        | 1        | 3        | 3        | 0        | 1        | 3         | 2         |
| 9 : VIDA  | 0        | 0        | 0        | 1        | 1        | 1        | 2        | 0        | 0        | 2         | 1         |
| 10 : REBE | 1        | 0        | 0        | 2        | 1        | 2        | 2        | 1        | 1        | 0         | 3         |
| 11 : ENCO | 0        | 0        | 0        | 1        | 1        | 1        | 0        | 1        | 0        | 0         | 0         |

© LIPSOR-EPTA-MICMAC

Figura 4.1 – Matriz de influência direta (MDI) das variáveis-chave

Para analisar a influência indireta entre as variáveis-chave, a matriz de

influência direta foi multiplicada sucessivamente por ela mesma até que a ordem das variáveis — baseada em sua motricidade e dependência — se estabilizasse, ou seja, não sofresse mais alterações (Figura 4.2).

|           | 1 : PEEE | 2 : MEPS | 3 : INOV | 4 : CUST | 5 : INRC | 6 : CPRC | 7 : MERC | 8 : PREC | 9 : VIDA | 10 : REBE | 11 : ENCO |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|
| 1 : PEEE  | 857      | 604      | 835      | 3821     | 3080     | 3903     | 3915     | 1836     | 1954     | 4339      | 4819      |
| 2 : MEPS  | 824      | 605      | 804      | 3646     | 2961     | 3716     | 3730     | 1781     | 1855     | 4142      | 4606      |
| 3 : INOV  | 574      | 420      | 543      | 2578     | 2024     | 2611     | 2622     | 1210     | 1305     | 2853      | 3173      |
| 4 : CUST  | 614      | 433      | 639      | 2699     | 2231     | 2722     | 2728     | 1320     | 1395     | 3097      | 3461      |
| 5 : INRC  | 504      | 378      | 508      | 2264     | 1842     | 2320     | 2342     | 1098     | 1150     | 2594      | 2860      |
| 6 : CPRC  | 590      | 409      | 554      | 2612     | 2078     | 2621     | 2637     | 1249     | 1352     | 2871      | 3254      |
| 7 : MERC  | 650      | 465      | 613      | 2888     | 2270     | 2898     | 2923     | 1369     | 1496     | 3133      | 3581      |
| 8 : PREC  | 788      | 585      | 791      | 3563     | 2891     | 3637     | 3673     | 1721     | 1826     | 4066      | 4489      |
| 9 : VIDA  | 374      | 271      | 377      | 1652     | 1343     | 1677     | 1686     | 798      | 845      | 1882      | 2096      |
| 10 : REBE | 571      | 434      | 574      | 2602     | 2115     | 2639     | 2657     | 1257     | 1319     | 2956      | 3254      |
| 11 : ENCO | 207      | 158      | 204      | 968      | 757      | 980      | 989      | 451      | 498      | 1065      | 1182      |

© UPSOR-EPITA-MICMAC

Figura 4.2 – Matriz de influência Indireta (MII) das variáveis-chave

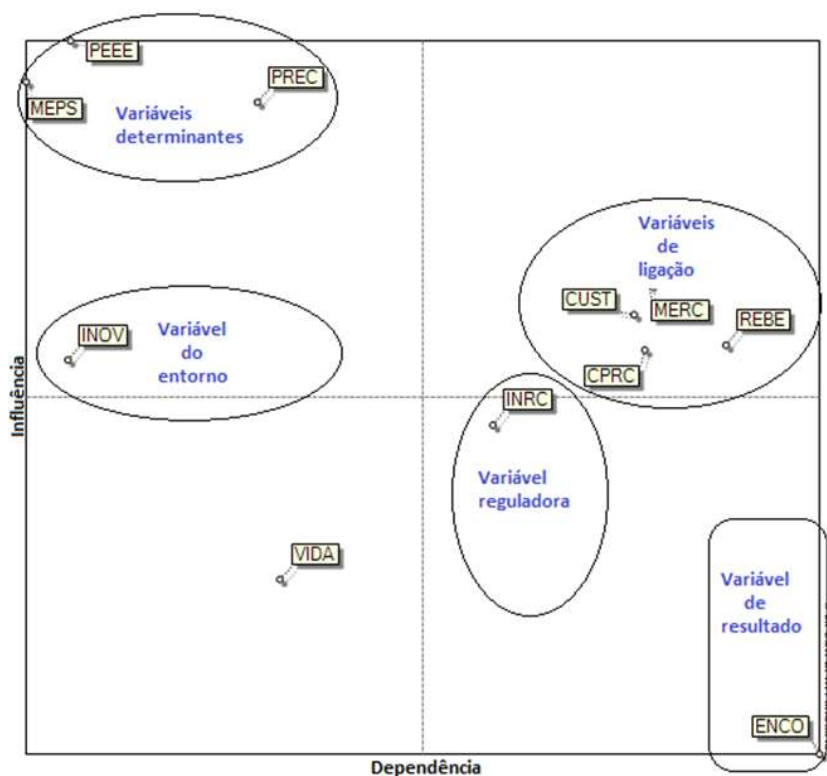
A análise estrutural permitiu classificar as 11 variáveis-chave com base em seus graus de influência e dependência indireta, conforme mostra adiante a Figura 4.3.

Como pode ser observado na Figura 4.3, as variáveis-chave foram agrupadas em cinco categorias: (i) variáveis determinantes ou forças-motrizes; (ii) variáveis do entorno; (iii) variáveis de ligação; (iv) variáveis reguladoras; e (v) variáveis de resultado.

As variáveis determinantes ou forças-motrizes situam-se no quadrante superior esquerdo do mapa influência-dependência. São as variáveis de maior relevância para explicar a evolução da questão objeto da cenarização juntamente com a análise dos condicionantes do futuro a elas associadas, a saber:

- Políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos novos (PEEE);
- Política de desempenho energético dos motores elétricos (MEPS);
- Preço de energia elétrica no Brasil (PREC).

A única variável do entorno ‘Inovação tecnológica e de processos do segmento de motores elétricos’ (INOV) localiza-se no quadrante superior esquerdo do diagrama influência-dependência, logo abaixo do conjunto das variáveis determinantes. Relaciona-se a questões relevantes do entorno, complementares às variáveis determinantes.



**Legenda:** PEEE – Políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos novos; MEPS – Política de desempenho energético dos motores elétricos; INOV – Inovação tecnológica e de processos do segmento de motores elétricos; CUST – Custo comparativo entre motores novos e reconicionados; INRC – Taxa de adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos; CPRC – Nível de conscientização e percepção por parte das empresas do setor industrial sobre motores elétricos reconicionados; MERC – Participação de motores elétricos novos de alta eficiência, reconicionados e importados de baixa eficiência no setor industrial no Brasil; PREC – Preço de energia elétrica no Brasil; VIDA – Potencial de extensão da vida útil de motores usados; REBE – Efeito rebote resultante da EE de motores elétricos de uso industrial; ENCO – Energia conservada.

Figura 4.3 – Mapa de influência-dependência indireta

As variáveis de ligação situam-se no quadrante superior direito e são variáveis de alta influência e alta dependência. Correspondem a:

- Custo comparativo entre motores novos e reconicionados (CUST);
- Nível de conscientização e percepção por parte das empresas do setor industrial sobre motores elétricos reconicionados (CPRC);
- Participação de motores elétricos novos de alta eficiência, reconicionados e importados de baixa eficiência no setor industrial no Brasil (MERC);
- Efeito rebote resultante da EE de motores elétricos de uso industrial (REBE).

Já as variáveis reguladoras são aquelas localizadas na área central do diagrama influência-dependência e que exercem um papel regulador na evolução das variáveis de resultado. No mapa da Figura 4.3, dizem respeito à:

- Taxa de adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos (INRC).

Por fim, a variável de resultado que se situa no quadrante inferior direito refere-se à ‘Energia conservada’ (ENCO).

#### 4.1.3. Identificação dos principais *stakeholders*

A identificação dos principais *stakeholders* constituiu uma etapa estratégica no desenvolvimento do modelo, possibilitando uma compreensão aprofundada dos papéis desempenhados pelas partes interessadas e de suas interações no sistema. A análise englobou atores governamentais, industriais e tecnológicos, ampliando a compreensão das dinâmicas setoriais e dos desafios estruturais e operacionais a serem enfrentados no contexto da eficiência energética. De modo particular, foram incorporados *stakeholders* diretamente vinculados aos potenciais efeitos rebote decorrentes da implementação de medidas de eficiência energética, reconhecendo-se a complexidade das interações sistêmicas no setor de motores elétricos industriais no horizonte até 2050.

O Quadro 4.1 sistematiza uma visão abrangente dos principais *stakeholders* e de seus respectivos interesses estratégicos no setor de motores elétricos industriais.

Quadro 4.1 – Principais *stakeholders* e influenciadores do futuro da eficiência energética de motores elétricos de uso industrial no Brasil

| <b>Stakeholder</b>                                                    | <b>Papel e interesses</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fabricantes de motores elétricos                                      | Desenvolvem e comercializam motores mais eficientes, buscando atender regulamentações e demanda do mercado. Interesse em inovação, competitividade e mitigação de efeitos rebote.                                                                                                                                                                             |
| Empresas de recondicionamento e manutenção                            | Responsáveis pela extensão da vida útil dos motores e melhoria da eficiência de equipamentos reconicionados. Interesse em garantir padrões de qualidade e reduzir desperdícios.                                                                                                                                                                               |
| Empresas industriais usuárias de motores elétricos                    | Principais consumidoras desses equipamentos, buscam eficiência energética para reduzir custos operacionais. Interesse na economia de energia, produtividade e impacto dos efeitos rebote.                                                                                                                                                                     |
| Agência reguladora (ANEEL)                                            | Regula o setor elétrico, criando incentivos e normas para eficiência energética sem comprometer a estabilidade da rede elétrica. Interesse na redução do consumo e dos impactos dos motores no sistema elétrico.                                                                                                                                              |
| Órgãos de normalização, regulamentação e fiscalização (INMETRO, ABNT) | Definem normas técnicas, regulamentos e requisitos de etiquetagem e certificação que estabelecem os níveis mínimos de eficiência energética para motores elétricos. Interesse em garantir qualidade, padronização e conformidade legal, promovendo maior eficiência no parque industrial e alinhamento com as metas nacionais de sustentabilidade energética. |

| <b>Stakeholder</b>                                                     | <b>Papel e interesses</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL)          | Coordenado pelo MME e executado pela ENBPar, promove ações de eficiência energética desde 1985. Concede o selo para equipamentos com melhores níveis de eficiência energética, incluindo motores elétricos.                                                                                                                                                                                                 |
| Formuladores de políticas públicas (MMA, MME, MDIC)                    | Criam políticas e incentivos para eficiência energética e sustentabilidade industrial. Interesse em mitigar efeitos rebote e impulsionar a economia circular e competitividade.                                                                                                                                                                                                                             |
| Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE) | Estabelece os níveis mínimos de eficiência energética para diversos equipamentos, incluindo motores elétricos trifásicos, em conformidade com o Programa Brasileiro de Etiquetagem e Lei de Eficiência Energética.                                                                                                                                                                                          |
| Instituições de pesquisa e universidades (ICTs)                        | Desenvolvem estudos sobre eficiência energética, impactos econômicos e ambientais, além da modelagem do efeito rebote. Interesse na inovação e formulação de políticas baseadas em evidências.                                                                                                                                                                                                              |
| ONGs e organismos internacionais                                       | Monitoram impactos ambientais e promovem boas práticas de eficiência energética e economia circular. Interesse na sustentabilidade e redução da pegada ecológica das empresas do setor.                                                                                                                                                                                                                     |
| Associações setoriais (ABESCO, ABINEE, ABIMAQ, CNI)                    | Representam interesses da indústria, promovendo padronização e inovação tecnológica. Interesse na competitividade do setor e influência em políticas públicas.                                                                                                                                                                                                                                              |
| Empresas do setor elétrico                                             | Gerenciam o fornecimento de energia e são afetadas pelo consumo dos motores industriais. Interesse em mitigar os efeitos rebote e garantir a estabilidade do sistema elétrico.                                                                                                                                                                                                                              |
| Consumidores finais e sociedade civil                                  | Demandam produtos e processos mais eficientes, impulsionando políticas de eficiência energética. Interesse na redução de custos e impactos ambientais.                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Fornecedores de matérias-primas e componentes                          | Afetam a disponibilidade de insumos para motores eficientes e sustentáveis. Interesse em tecnologias que otimizem materiais e processos produtivos.                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Laboratórios de ensaios de certificação (PUC-RS, USP e CEPEL)          | Desempenham um papel essencial para garantir qualidade, segurança, desempenho e conformidade com normas técnicas nacional e internacional. Esses laboratórios realizam ensaios rigorosos que permitem validar características de motores elétricos, sejam monofásicos ou trifásicos, de pequenas ou médias potências, assegurando que os produtos estejam prontos para comercialização e utilização segura. |

Observa-se que muitos desses interesses são sobrepostos e interdependentes, configurando um ambiente propício à identificação de sinergias e à promoção de colaborações interinstitucionais. Tal configuração favorece o desenvolvimento de políticas públicas integradas, a implementação de projetos conjuntos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), a normalização de processos, a padronização de métricas e o compartilhamento estruturado de conhecimento e recursos.

Dentre o stakeholders listados, é necessário destacar o INMETRO, que exerce um papel fundamental como stakeholder na promoção da eficiência energética de motores elétricos no Brasil. Por meio da regulamentação técnica e da certificação compulsória, o INMETRO assegura que os motores comercializados atendam a

padrões mínimos de desempenho energético, alinhando-se a normas internacionais. Essa atuação contribui diretamente para a proteção do consumidor, ao evitar o uso de equipamentos ineficientes, e para o fortalecimento da indústria nacional, ao estimular a inovação tecnológica. Além disso, ao promover o uso racional da energia elétrica, o INMETRO impacta positivamente na redução das emissões de gases de efeito estufa, colaborando com políticas públicas voltadas à sustentabilidade e à transição energética. Sua integração com programas como o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) e sua atuação conjunta com órgãos como MCTI, EPE e ANEEL reforçam sua relevância na construção de uma matriz energética mais eficiente e ambientalmente responsável. O monitoramento contínuo e a fiscalização rigorosa dos produtos garantem a confiabilidade do mercado e a atualização constante dos requisitos técnicos, consolidando o INMETRO como um agente estratégico na governança da eficiência energética no setor eletromecânico.

Assim, a estruturação desse panorama de *stakeholders* revela um ecossistema dinâmico e interdependente, no qual o êxito da implementação de medidas de eficiência energética depende diretamente da coordenação efetiva entre os diversos atores e do alinhamento estratégico de seus interesses e objetivos institucionais.

#### **4.1.4. Caracterização da situação atual (2025)**

A eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil é um tema central para a descarbonização da economia e a competitividade industrial até 2050. Atualmente, os sistemas motrizes representam cerca de 68 % do consumo de eletricidade na indústria brasileira, sendo o foco de diversas políticas públicas e iniciativas privadas para melhorar seu desempenho energético.

O PNE 2050 estabeleceu metas ambiciosas para a eficiência energética, visando uma redução de 20 % no consumo final de energia até 2050 em comparação com um cenário de referência.

O Quadro 4.2 sintetiza a situação atual das variáveis-chave definidas previamente no Capítulo 3.

Quadro 4.2 – Situação atual das variáveis-chave do sistema (2025)

| Variável-chave                                                                                                                 | Situação atual (2025)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Fonte         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| PEEE – Políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos novos.                                               | Além dos MEPS e do selo PROCEL, existem o PotencializEE, programa Brasil-Alemanha para eficiência energética em pequenas e médias indústrias e o Brasil mais produtivo, que também foca em ações de eficiência energética em PMEs.                                                                                                                                      | EPE (2024a)   |
| MEPS – Política de desempenho energético dos motores elétricos.                                                                | Emprego de motores com padrão IR3. Proibição da venda de motores reconicionados que não atendam ao padrão mínimo IR3. Fiscalização limitada e penalidades brandas.                                                                                                                                                                                                      | Vieira (2018) |
| INOV – Inovação tecnológica e de processos do segmento de motores elétricos.                                                   | Avanços significativos, especialmente impulsionados por empresas como WEG, líder global no setor. Incorporação de tecnologias de IoT para monitoramento em tempo real. Motores com maior eficiência energética (IR4 e IR5), que atendem o mercado exterior.<br>Baixa inovação no mercado de motores reconicionados, com poucas oficinas credenciadas pelos fabricantes. | Vieira (2018) |
| CUST – Custo comparativo entre motores novos e reconicionados.                                                                 | Motores novos exigem investimento inicial três vezes maior que reconicionados. Oferecem garantias, certificações e acesso a financiamentos. Motores reconicionados têm aquisição mais rápida e barata, mas baixa eficiência energética, a depender da oficina.                                                                                                          | Vieira (2018) |
| INRC – Taxa de adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos.                         | Baixa adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos realizados pela maioria das oficinas no Brasil. Serviços melhores e mais criteriosos realizados por aquelas oficinas que são credenciadas pelos fabricantes como a Weg.                                                                                                    | Vieira (2018) |
| CPRC – Nível de conscientização e percepção por parte das empresas do setor industrial sobre motores elétricos reconicionados. | Maior nível de conscientização e percepção por parte das indústrias de grande porte por terem gestores de energia melhor capacitados.                                                                                                                                                                                                                                   | Vieira (2018) |
| MERC – Participação de motores elétricos no setor industrial no Brasil.                                                        | Mix variável, sem controle do mercado de reconicionados e importados de baixa qualidade.<br>Novos: 13,55 %;<br>Reconicionados: 10,27 %;<br>Importados de baixa qualidade (BQ): 3,41 %.<br>Motores em operação: 72,76 %                                                                                                                                                  | Vieira (2018) |

| <b>Variável-chave</b>                                                         | <b>Situação atual (2025)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>Fonte</b>  |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| PREC – Preço de energia elétrica no Brasil.                                   | Preço de energia moderado, quando comparado com outros países, por conta da sobrecontratação das distribuidoras (aumento da geração distribuída) e abertura parcial do mercado livre para os consumidores de alta tensão (grupo A).                                                                               | EPE (2024a)   |
| VIDA – Potencial de extensão da vida útil de motores usados.                  | Atualmente, a maioria dos motores industriais no Brasil acompanha a média de idade das plantas fabris, estimada em 17 anos. A vida útil dos motores industriais pode ser estendida em 5 a 7 anos por recondição, mas o desempenho e confiabilidade variam conforme a qualidade do serviço e das peças utilizadas. | Vieira (2018) |
| REBE – Efeito rebote resultante da EE de motores elétricos de uso industrial. | Efeito rebote ainda não foi quantificado pelos órgãos competentes (MME, EPE, PROCEL, ANEEL). Valor estimado pelo autor para este trabalho.                                                                                                                                                                        | autor         |
| ENCO – Energia conservada.                                                    | A economia de energia obtida com motores eficientes geralmente varia entre 5 % e 15 % em condições típicas, podendo atingir até 31 % quando combinada a inversores e manutenção adequada, segundo auditorias recentes.                                                                                            | EPE(2024a)    |

O panorama atual da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil em 2025 caracteriza-se por um contexto de transição, marcado por avanços tecnológicos significativos em paralelo a desafios estruturais que ainda limitam a plena realização do potencial de conservação energética no setor industrial. A análise das variáveis-chave revela um panorama complexo, onde coexistem iniciativas governamentais promissoras, inovações tecnológicas de ponta e lacunas regulatórias que comprometem a efetividade das políticas públicas.

### **Marco regulatório e políticas públicas**

O arcabouço de políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos (PEEE) apresenta diversificação crescente, embora ainda careça de maior integração sistêmica. Além dos tradicionais Padrões Mínimos de Desempenho Energético (MEPS) e do Selo PROCEL, consolidaram-se programas específicos como o PotencializEE, fruto da cooperação Brasil-Alemanha voltada às pequenas e médias empresas industriais.

O Brasil Mais Produtivo amplia o escopo das ações de eficiência energética nas PMEs. Essa multiplicidade de iniciativas, embora demonstre reconhecimento da importância estratégica do tema, evidencia também a necessidade de maior coordenação entre os diferentes instrumentos de política.

A política de desempenho energético dos motores elétricos (MEPS) estabelece como padrão mínimo obrigatório a classe IR3 para motores novos, alinhando-se às práticas internacionais de países industrializados. Paralelamente, existe proibição formal da comercialização de motores reconicionados que não atendam a esse padrão mínimo. Contudo, a efetividade dessa regulamentação é comprometida pela fiscalização limitada e pela aplicação de penalidades consideradas brandas pelo mercado, resultando em cumprimento heterogêneo das normas estabelecidas.

### **Dinâmica da inovação tecnológica**

O setor de motores elétricos no Brasil passa por um período de avanços tecnológicos, liderado por empresas como internacionais como Siemens, ABB e a nacional WEG, que se consolidou como referência global em soluções de eficiência energética. Os avanços mais significativos concentram-se na incorporação de tecnologias de Internet das Coisas (IoT) para monitoramento em tempo real,

permitindo otimização contínua do desempenho energético e manutenção preditiva. A produção nacional já alcança padrões superiores de eficiência energética (IR4 e IR5), destinados prioritariamente ao mercado externo, demonstrando capacidade técnica instalada para atender às demandas mais exigentes.

Paradoxalmente, o mercado de motores reconicionados apresenta baixíssimo nível de inovação tecnológica. A maioria das oficinas de recondicionamento opera com tecnologias básicas e processos artesanais, comprometendo tanto a qualidade quanto a eficiência energética dos equipamentos restaurados. Apenas oficinas credenciadas pelos fabricantes, principalmente pela WEG, oferecem serviços com padrões mais criteriosos e emprego de tecnologias avançadas, mas representam parcela minoritária do mercado de recondicionamento.

### **Estrutura de custos e decisões de investimento**

A dinâmica econômica do setor é caracterizada pela significativa disparidade de custos entre motores novos e reconicionados. Motores novos de alta eficiência exigem investimento inicial aproximadamente três vezes superior aos reconicionados, embora apresentem períodos de retorno do investimento relativamente atrativos, variando entre 1,5 a 2 anos. Essa vantagem econômica dos motores novos é reforçada pelo acesso a garantias estendidas, certificações técnicas e linhas de financiamento especializadas, fatores que reduzem riscos operacionais e financeiros para as empresas.

Os motores reconicionados mantêm atratividade pela aquisição mais rápida e custos iniciais reduzidos, características especialmente valorizadas por empresas de menor porte ou com restrições de capital de giro. Contudo, sua eficiência energética é variável e frequentemente inferior, dependendo criticamente da qualidade do serviço de recondicionamento e das peças utilizadas no processo.

### **Conscientização industrial e mercado**

O nível de conscientização sobre eficiência energética apresenta marcante heterogeneidade entre diferentes portes de empresas industriais. Grandes indústrias demonstram maior conscientização e percepção técnica sobre os impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade, reflexo da presença de gestores de energia mais bem capacitados e estruturas organizacionais dedicadas à otimização energética. Essas empresas tendem a adotar critérios mais rigorosos na seleção de

equipamentos, priorizando aspectos como ciclo de vida, eficiência operacional e impactos ambientais.

A participação no mercado reflete essa fragmentação de conscientização e capacidade técnica. Motores novos de alta eficiência representam 49 % do mercado, enquanto motores reconicionados ocupam 37 % e equipamentos importados de baixa qualidade respondem por 14 % das aquisições. Essa distribuição evidencia ausência de controle efetivo sobre os segmentos de menor qualidade, permitindo que equipamentos inadequados continuem circulando no mercado industrial.

É importante esclarecer que, entre os motores novos disponíveis no mercado, existem modelos importados que apresentam boa qualidade e conformidade com normas técnicas, sendo frequentemente fornecidos por fabricantes reconhecidos internacionalmente, diferentemente dos motores importados de baixa qualidade, que representam um risco significativo para a confiabilidade operacional e a eficiência energética. Esses equipamentos, em geral, não passam por processos adequados de fiscalização alfandegária e são adquiridos principalmente por meio de plataformas de comércio eletrônico, sem garantia de atendimento a padrões mínimos de desempenho ou segurança. Essa distinção é fundamental para evitar generalizações e para reforçar a necessidade de políticas que assegurem critérios técnicos rigorosos na aquisição de motores, independentemente da origem.

### **Condições energéticas e econômicas**

O preço da energia elétrica no Brasil mantém-se em patamares moderados comparativamente ao cenário internacional, resultado da sobrecontratação das distribuidoras decorrente da expansão acelerada da geração distribuída e da abertura parcial do mercado livre para consumidores do grupo A (alta tensão). Essa situação reduz incentivos econômicos diretos para investimentos em eficiência energética, uma vez que os benefícios financeiros da modernização são menos pronunciados.

### **Potencial de extensão de vida útil dos motores elétricos**

A idade média dos motores industriais no Brasil acompanha o perfil das plantas fabris, estimada em 17 anos, indicando significativo potencial de modernização do parque instalado. O recondicionamento técnico pode estender a vida útil dos equipamentos em 5 a 7 anos adicionais, mas os resultados em termos de desempenho e confiabilidade variam drasticamente conforme a qualidade do serviço e das peças de reposição empregadas. Essa variabilidade representa

obstáculo à padronização de resultados e limita a confiança das empresas nos serviços de condicionamento.

### **Lacunas de medição e avaliação dos efeitos rebote**

Uma limitação crítica do sistema atual é a ausência de medição sistemática dos efeitos rebote resultantes das melhorias de eficiência energética dos motores elétricos industriais. Órgãos competentes como Ministério de Minas e Energia (MME); Empresa de Pesquisa Energética (EPE); Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL); e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) ainda não desenvolveram metodologias específicas para quantificar esse fenômeno, impedindo avaliação realista da efetividade das políticas implementadas. Essa lacuna metodológica compromete a capacidade de otimização das estratégias de eficiência energética e pode resultar em superestimação dos benefícios ambientais das políticas vigentes.

### **Resultados de conservação de energia**

Apesar das limitações sistêmicas, as iniciativas de eficiência energética demonstram resultados mensuráveis. A economia de energia obtida com motores eficientes varia entre 5 % e 15 % em condições operacionais típicas, podendo alcançar até 31 % quando combinada com inversores de frequência e manutenção adequada. Esses resultados, confirmados por auditorias energéticas recentes, evidenciam o potencial técnico disponível e justificam a continuidade dos investimentos em modernização do parque industrial.

O panorama atual, portanto, caracteriza-se pela coexistência de oportunidades significativas e desafios estruturais que demandam abordagem sistêmica e integrada para maximização dos benefícios da eficiência energética industrial no Brasil.

#### **4.1.5.**

#### **Identificação dos principais condicionantes do futuro**

No horizonte de 2050, a busca por eficiência energética e pela redução do consumo de energia em motores elétricos industriais será moldada por determinantes futuros interconectados que configuram um cenário complexo e dinâmico. Essa transformação estrutural resulta da convergência de múltiplos fatores que transcendem aspectos puramente tecnológicos, abrangendo dimensões

regulatórias, econômicas, sociais e ambientais que se influenciam mutuamente e definem as trajetórias possíveis para o setor industrial brasileiro.

### **Regulação e políticas públicas: arcabouço institucional em evolução**

O PNE 2050 estabelece diretrizes fundamentais que destacam a importância de políticas públicas coordenadas para incentivar a eficiência energética e a redução do consumo de energia no setor industrial. Este arcabouço regulatório evolui em resposta aos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, particularmente no âmbito do Acordo de Paris e das metas de neutralidade climática estabelecidas para 2050.

O cenário regulatório atual caracteriza-se pela fragmentação de instrumentos, com políticas de eficiência energética distribuídas entre diferentes órgãos e esferas governamentais. O PROCEL e o Programa de Eficiência Energética da ANEEL, além de iniciativas do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), compõem um mosaico de incentivos que, embora relevantes, carecem de maior integração sistêmica. A tendência para 2050 aponta para a consolidação de marcos regulatórios mais robustos, incluindo padrões mínimos obrigatórios de eficiência para motores industriais, sistemas de certificação mais rigorosos e mecanismos de precificação de carbono que internalizem externalidades ambientais.

A promoção da pesquisa e desenvolvimento de tecnologias limpas e sustentáveis emerge como prioridade estratégica, demandando parcerias público-privadas mais estruturadas e investimentos significativos em centros de excelência nacionais. A experiência internacional sugere que países líderes em eficiência energética industrial desenvolveram ecossistemas inovativos que articulam universidades, institutos de pesquisa e empresas em torno de objetivos comuns de descarbonização industrial.

### **Avanços tecnológicos elevando eficiência energética**

A evolução tecnológica nacional no segmento de eficiência energética apresenta potencial transformador para o desempenho dos motores elétricos industriais. As trajetórias tecnológicas convergem para materiais avançados, designs otimizados e sistemas de controle inteligentes que podem elevar substancialmente os patamares de eficiência alcançáveis.

Os motores de ímas permanentes, tecnologias de relutância síncrona e sistemas de acionamento com eletrônica de potência avançada representam fronteiras tecnológicas que podem redefinir os limites de eficiência. Materiais supercondutores em temperatura ambiente, embora ainda em desenvolvimento, prometem revolucionar a concepção de máquinas elétricas até 2050. Paralelamente, o desenvolvimento de ligas metálicas especiais e técnicas de fabricação aditiva permitem otimizações geométricas impossíveis com métodos convencionais.

A digitalização dos sistemas industriais constitui vetor fundamental dessa transformação, integrando tecnologias de Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e análise de big data para otimização contínua do desempenho energético. Sistemas de manutenção preditiva baseados em algoritmos de aprendizagem de máquinas podem antecipar degradações de eficiência e programar intervenções preventivas, maximizando a vida útil e o desempenho dos equipamentos.

### **Pressões econômicas e competitividade: Imperativo da eficiência energética**

A eficiência energética consolida-se como fator crítico para a competitividade e resiliência do setor industrial brasileiro. Em um contexto de volatilidade crescente nos preços de energia e matérias-primas, empresas que adotam práticas eficientes posicionam-se estrategicamente para enfrentar choques externos e mudanças regulatórias.

O custo de energia elétrica industrial no Brasil, historicamente moderado em comparação internacional, intensifica a pressão por soluções eficientes. Projeções indicam que essa tendência se manterá até 2050, impulsionada por investimentos necessários em infraestrutura de transmissão, modernização do parque gerador e internalização de custos ambientais. Consequentemente, a redução da intensidade energética torna-se imperativo econômico para preservação de margens operacionais e competitividade internacional.

A busca por redução de custos operacionais catalisa investimentos em tecnologias mais eficientes, criando círculo virtuoso onde economias energéticas financiam modernizações adicionais. Empresas industriais brasileiras reconhecem crescentemente que eficiência energética não constitui apenas medida de sustentabilidade, mas estratégia fundamental de gestão de riscos e otimização financeira.

Além disso, pressões de cadeias globais de valor por práticas ESG (*Environmental, Social, and Governance*) mais rigorosas estabelecem critérios de eficiência energética como pré-requisitos para participação em mercados internacionais. Grandes corporações multinacionais implementam políticas de fornecedores que exigem demonstração de práticas sustentáveis, incluindo métricas específicas de eficiência energética.

### **Transformação digital e indústria 4.0: Convergência tecnológica**

A integração de tecnologias digitais na indústria brasileira acelera a gestão eficiente do consumo energético através de sensores inteligentes, sistemas de monitoramento em tempo real e plataformas integradas de gestão energética. Esta transformação representa mudança paradigmática na operação industrial, migrando de abordagens reativas para estratégias preditivas e prescritivas de otimização energética.

Sistemas de monitoramento baseados em sensores IoT permitem granularidade sem precedentes no acompanhamento do desempenho energético, identificando padrões de consumo, ineficiências operacionais e oportunidades de otimização em tempo real. A implementação de gêmeos digitais (*digital twins*) de processos industriais viabiliza simulações avançadas que antecipam impactos de mudanças operacionais no consumo energético.

A convergência entre tecnologias da informação e sistemas de automação industrial cria ecossistemas digitais integrados onde decisões de eficiência energética são automatizadas através de algoritmos de otimização multi-objetivo. Esses sistemas consideram simultaneamente eficiência energética, qualidade de produção, disponibilidade de equipamentos e custos operacionais, maximizando performance global dos processos.

A digitalização facilita também a implementação ágil de medidas corretivas, permitindo ajustes operacionais em tempo real baseados em análise contínua de dados energéticos. Sistemas de gestão energética ISO 50001 automatizam ciclos de melhoria contínua, estabelecendo novos patamares de eficiência operacional.

### **Transição energética e descarbonização**

A transição para uma matriz energética mais limpa e a busca pela neutralidade de carbono até 2050 constituem forças motrizes fundamentais para adoção de

motores elétricos mais eficientes. Este processo transcende aspectos tecnológicos, envolvendo reconfiguração estrutural dos sistemas produtivos e cadeias de valor industriais.

A eletrificação de processos industriais tradicionalmente dependentes de combustíveis fósseis demanda equipamentos com eficiência superior para viabilizar a transição econômica. Subsetores como siderurgia, cimenteiro e petroquímico enfrentam desafios particulares na substituição de fontes energéticas, requerendo soluções tecnológicas inovadoras que mantenham competitividade durante a transição.

A expansão de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, particularmente energia solar e eólica, cria oportunidades para otimização do consumo industrial através de sistemas de gestão de demanda que sincronizam operações com disponibilidade de energia limpa. Esta integração exige motores e sistemas de acionamento com flexibilidade operacional para aproveitar janelas de energia abundante e baixo custo.

Além disso, a descarbonização industrial impulsiona desenvolvimento de cadeias produtivas nacionais para tecnologias de eficiência energética, reduzindo dependência de importações e criando oportunidades de exportação de soluções brasileiras. A consolidação deste setor representa potencial de transformação da indústria nacional em referência global para soluções de eficiência energética adaptadas a contextos tropicais e de países em desenvolvimento.

#### **4.1.6. Construção de cenários prospectivos**

Esta seção apresenta os resultados da construção de quatro cenários prospectivos para a eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil, desenvolvidos conforme a metodologia descrita na Subseção 3.2.6. O processo de geração de cenários do futuro fundamentou-se na aplicação sistemática das técnicas de prospectiva estratégica (Godet, 1993; 2000), culminando na elaboração de matrizes morfológicas (Zwicky, 1969), que sintetizam trajetórias alternativas para o período 2025-2050.

Os cenários prospectivos contemplam diferentes configurações de variáveis-chave identificadas na análise estrutural, resultando em quatro trajetórias distintas que capturam a diversidade de futuros possíveis para a eficiência energética de motores elétricos industriais no contexto brasileiro e efeitos rebote associados:

- Cenário 1: Regulamentação seletiva (Figura 4.4) - caracterizado por políticas públicas fragmentadas e implementação parcial de medidas de eficiência energética;
- Cenário 2: Transição regulatória (Figura 4.5) - marcado por um processo gradual de fortalecimento do arcabouço regulatório e crescente adoção de motores elétricos eficientes;
- Cenário 3: Regulamentação rigorosa com paradoxo (Figura 4.6) - definido por políticas rigorosas de eficiência energética que, paradoxalmente, intensificam os efeitos rebote devido a fatores comportamentais e econômicos;
- Cenário 4: Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável (Figura 4.7) - configurado por um conjunto coordenado de políticas que promovem eficiência energética minimizando simultaneamente os efeitos rebote.

A análise de cada cenário abrange três dimensões complementares: (i) síntese narrativa da trajetória evolutiva ao longo do horizonte temporal considerado; (ii) caracterização dos tipos e intensidades dos efeitos rebote manifestados; e (iii) identificação e análise dos fatores determinantes que atuam como mitigadores ou amplificadores dos efeitos rebote em cada contexto cenário.

Esta arquitetura analítica integrada proporciona uma compreensão multidimensional dos desafios e oportunidades inerentes à implementação de políticas de eficiência energética no contexto industrial brasileiro, subsidiando a formulação de estratégias mais robustas e eficazes para o setor.

| Cenário 1 – Regulamentação seletiva                                                                                                              |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Variáveis                                                                                                                                        | Hipóteses                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                                          |
| Políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos novos (PEEE)                                                                  | Baixa efetividade.                                                                                                                                      | Efetividade moderada.                                                                                                                                      | Alta efetividade.                                                                                                                                           |                                          |
| Política de desempenho energético dos motores elétricos (MEPS)                                                                                   | Mínimo IR3 com abrangência parcial. Fiscalização limitada da venda de motores reconicionados.                                                           | Migração para padrões IR3/IR4 com abrangência crescente. Fiscalização moderada da venda de motores reconicionados.                                         | Padrões muito rigorosos (>IR4) obrigatórios. Exigência IR4/IR5 com inversor de frequência. Fiscalização rigorosa da venda de motores reconicionados.        |                                          |
| Inovação tecnológica e de processos do segmento de motores elétricos (INOV)                                                                      | Taxa moderada de inovação; restrita a motores novos.                                                                                                    | Taxa moderada de inovação; para motores novos e para alguns processos dos motores reconicionados.                                                          | Alta taxa de inovação para motores novos e para maior parte dos processos dos motores reconicionados.                                                       |                                          |
| Custo comparativo entre motores novos e reconicionados (CUST)                                                                                    | Custo muito alto de motores novos eficientes.                                                                                                           | Custo alto de motores novos eficientes.                                                                                                                    | Custo moderado de motores novos eficientes.                                                                                                                 | Custo baixo de motores novos eficientes. |
| Taxa de adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos (INRC)                                            | Baixa adoção de tecnologias. Uso de equipamentos básicos. Certificação mínima.                                                                          | Adoção moderada e seletiva. Adoção de tecnologias básicas (estufa, por exemplo). Certificação parcial.                                                     | Adoção ampla de tecnologias avançadas. Automação e controle precisos. Certificação completa.                                                                |                                          |
| Nível de conscientização e percepção por parte das empresas do setor industrial sobre motores elétricos reconicionados (CPRC)                    | Pouco conhecimento sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados escassos sobre o desempenho dos motores reconicionados. | Conhecimento parcial sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados limitados sobre o desempenho dos motores reconicionados. | Conhecimento técnico sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados confiáveis sobre o desempenho dos motores reconicionados. |                                          |
| Participação de motores elétricos novos de alta eficiência, reconicionados e importados de baixa eficiência no setor industrial no Brasil (MERC) | Novos: 50 %;<br>Reconicionados: 35 %; Importados BQ: 15 %.<br>Sem controle do mercado de reconicionados e importados BQ.                                | Novos: 60 %;<br>Reconicionados: 30 %;<br>Importados BQ: 10 %.<br>Controle razoável do mercado de reconicionados e importados BQ.                           | Novos: 70 %;<br>Reconicionados: 25 %;<br>Importados BQ: 5 %.<br>Controle mais rigoroso do mercado de reconicionados e importados BQ.                        | Muito alto                               |
| Preço de energia elétrica no Brasil (PREC)                                                                                                       | Muito baixo                                                                                                                                             | Baixo                                                                                                                                                      | Moderado                                                                                                                                                    | Alto                                     |
| Potencial de extensão da vida útil de motores usados (VIDA)                                                                                      | Potencial limitado. 3-5 anos adicionais. Desempenho reduzido.                                                                                           | Potencial moderado com boas práticas. 5-7 anos adicionais. Desempenho mantido. Confiabilidade média.                                                       |                                                                                                                                                             |                                          |
| Efeito rebote resultante da EE de motores elétricos de uso industrial (REBE)                                                                     | Efeito rebote baixo.                                                                                                                                    | Efeito rebote moderado.                                                                                                                                    |                                                                                                                                                             |                                          |
| Energia conservada (ENCO)                                                                                                                        | 0 – 5 %                                                                                                                                                 | 5 – 10 %                                                                                                                                                   | 10 – 15 %                                                                                                                                                   | 15 – 30 %                                |

Figura 4.4 – Matriz morfológica referente ao Cenário 1: 'Regulamentação seletiva'

| Cenário 2: Transição regulatória                                                                                                                 |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                                            |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------|
| Variáveis                                                                                                                                        | Hipóteses                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                                            |            |
|                                                                                                                                                  | Baixa efetividade                                                                                                                                       | Efetividade moderada                                                                                                                                       | Alta efetividade                                                                                                                                            |                                            |            |
| Políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos novos (PEEE)                                                                  |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             |                                            |            |
| Política de desempenho energético dos motores elétricos (MEPS)                                                                                   | Mínimo IR3 com abrangência parcial. Fiscalização limitada da venda de motores reconicionados.                                                           | Migração para padrões IR3/IR4 com abrangência crescente. Fiscalização moderada da venda de motores reconicionados.                                         | Padrões muito rigorosos (>IR4) obrigatórios. Exigência IR4/IR5 com inversor de frequência. Fiscalização rigorosa da venda de motores reconicionados.        |                                            |            |
| Inovação tecnológica e de processos do segmento de motores elétricos (INOV)                                                                      | Taxa moderada de inovação; restrita a motores novos.                                                                                                    | Taxa moderada de inovação; para motores novos e para alguns processos dos motores reconicionados.                                                          | Alta taxa de inovação para motores novos e para maior parte dos processos dos motores reconicionados.                                                       |                                            |            |
| Custo comparativo entre motores novos e reconicionados (CUST)                                                                                    | Custo muito alto de motores novos e eficientes.                                                                                                         | Custo alto de motores novos e eficientes.                                                                                                                  | Custo moderado de motores novos e eficientes.                                                                                                               | Custo baixo de motores novos e eficientes. |            |
| Taxa de adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos (INRC)                                            | Baixa adoção de tecnologias. Uso de equipamentos básicos. Certificação mínima.                                                                          | Adoção moderada e seletiva. Adoção de tecnologias básicas (estufa, por exemplo). Certificação parcial.                                                     | Adoção ampla de tecnologias avançadas. Automação e controle precisos. Certificação completa.                                                                |                                            |            |
| Nível de conscientização e percepção por parte das empresas do setor industrial sobre motores elétricos reconicionados (CPRC)                    | Pouco conhecimento sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados escassos sobre o desempenho dos motores reconicionados. | Conhecimento parcial sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados limitados sobre o desempenho dos motores reconicionados. | Conhecimento técnico sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados confiáveis sobre o desempenho dos motores reconicionados. |                                            |            |
| Participação de motores elétricos novos de alta eficiência, reconicionados e importados de baixa eficiência no setor industrial no Brasil (MERC) | Novos: 50 %;<br>Reconicionados: 35 %; Importados BQ: 15 %.<br>Sem controle do mercado de reconicionados e importados BQ.                                | Novos: 60 %;<br>Reconicionados: 30 %;<br>Importados BQ: 10 %.<br>Controle razoável do mercado de reconicionados e importados BQ.                           | Novos: 70 %;<br>Reconicionados: 25 %;<br>Importados BQ: 5 %.<br>Controle mais rigoroso do mercado de reconicionados e importados BQ.                        |                                            |            |
| Preço de energia elétrica no Brasil (PREC)                                                                                                       | Muito baixo                                                                                                                                             | Baixo                                                                                                                                                      | Moderado                                                                                                                                                    | Alto                                       | Muito alto |
| Potencial de extensão da vida útil de motores usados (VIDA)                                                                                      | Potencial limitado. 3-5 anos adicionais. Desempenho reduzido.                                                                                           | Potencial moderado com boas práticas. 5-7 anos adicionais. Desempenho mantido. Confiabilidade média.                                                       |                                                                                                                                                             |                                            |            |
| Efeito rebote resultante da EE de motores elétricos de uso industrial (REBE)                                                                     | Efeito rebote baixo                                                                                                                                     | Efeito rebote moderado                                                                                                                                     |                                                                                                                                                             |                                            |            |
| Energia conservada (ENCO)                                                                                                                        | 0 – 5 %                                                                                                                                                 | 5 – 10 %                                                                                                                                                   | 10 – 15 %                                                                                                                                                   | Efeito rebote alto                         |            |
|                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                             | 15 – 30 %                                  |            |

Figura 4.5 – Matriz morfológica referente ao Cenário 2: 'Transição regulatória'

| Cenário 3: Regulamentação rigorosa com paradoxo                                                                                                  |  |                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                            |                                                        |                                                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Variáveis                                                                                                                                        |  | Hipóteses                                                                                                                                               |                                                                                                                                                            |                                                        |                                                                                                                                                             |
| Políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos novos (PEEE)                                                                  |  | Baixa efetividade                                                                                                                                       | Efetividade moderada                                                                                                                                       |                                                        | Alta efetividade                                                                                                                                            |
| Política de desempenho energético dos motores elétricos (MEPS)                                                                                   |  | Mínimo IR3 com abrangência parcial. Fiscalização limitada da venda de motores reconicionados.                                                           | Migração para padrões IR3/IR4 com abrangência crescente. Fiscalização moderada da venda de motores reconicionados.                                         |                                                        | Padrões muito rigorosos (>IR4) obrigatórios. Exigência IR4/IR5 com inversor de frequência. Fiscalização rigorosa da venda de motores reconicionados.        |
| Inovação tecnológica e de processos do segmento de motores elétricos (INOV)                                                                      |  | Taxa moderada de inovação; restrita a motores novos.                                                                                                    | Taxa moderada de inovação; para motores novos e para alguns processos dos motores reconicionados.                                                          |                                                        | Alta taxa de inovação para motores novos e para maior parte dos processos dos motores reconicionados.                                                       |
| Custo comparativo entre motores novos e reconicionados (CUST)                                                                                    |  | Custo muito alto de motores novos e eficientes.                                                                                                         | Custo alto de motores novos                                                                                                                                | Custo moderado de motores novos e eficientes.          | Custo baixo de motores novos e eficientes.                                                                                                                  |
| Taxa de adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos (INRC)                                            |  | Baixa adoção de tecnologias. Uso de equipamentos básicos. Certificação mínima.                                                                          | Adoção moderada e seletiva. Adoção de tecnologias básicas (estufa, por exemplo). Certificação parcial.                                                     |                                                        | Adoção ampla de tecnologias avançadas. Automação e controle precisos. Certificação completa.                                                                |
| Nível de conscientização e percepção por parte das empresas do setor industrial sobre motores elétricos reconicionados (CPRC)                    |  | Pouco conhecimento sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados escassos sobre o desempenho dos motores reconicionados. | Conhecimento parcial sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados limitados sobre o desempenho dos motores reconicionados. |                                                        | Conhecimento técnico sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados confiáveis sobre o desempenho dos motores reconicionados. |
| Participação de motores elétricos novos de alta eficiência, reconicionados e importados de baixa eficiência no setor industrial no Brasil (MERC) |  | Novos: 50 %; Reconicionados: 35 %; Importados BQ: 15 %.<br>Sem controle do mercado de reconicionados e importados BQ.                                   | Novos: 60 %; Reconicionados: 30 %; Importados BQ: 10 %.                                                                                                    | Novos: 70 %; Reconicionados: 25 %; Importados BQ: 5 %. | Novos: 70 %; Reconicionados: 25 %; Importados BQ: 5 %.                                                                                                      |
| Preço de energia elétrica no Brasil (PREC)                                                                                                       |  | Muito baixo                                                                                                                                             | Baixo                                                                                                                                                      | Moderado                                               | Alto                                                                                                                                                        |
| Potencial de extensão da vida útil de motores usados (VIDA)                                                                                      |  | Potencial limitado. 3-5 anos adicionais. Desempenho reduzido.                                                                                           | Potencial moderado com boas práticas. 5-7 anos adicionais. Desempenho mantido. Confiabilidade média.                                                       |                                                        | Alto potencial com tecnologias avançadas. 8 ou mais anos adicionais - Desempenho mantido. Confiabilidade alta.                                              |
| Efeito rebote resultante da EE de motores elétricos de uso industrial (REBE)                                                                     |  | Efeito rebote baixo                                                                                                                                     | Efeito rebote moderado                                                                                                                                     |                                                        | Efeito rebote alto                                                                                                                                          |
| Energia conservada (ENCO)                                                                                                                        |  | 0 – 5 %                                                                                                                                                 | 5 – 10 %                                                                                                                                                   | 10 – 15 %                                              | 15 – 30 %                                                                                                                                                   |

Figura 4.6 – Matriz morfológica referente ao Cenário 3: 'Regulamentação rigorosa com paradoxo'

| Cenário 4: Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável                                                                                     |                                                                                                                                                         |  |                                                                                                                                                            |  |  |                                                                                                                                                             |  |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| Variáveis                                                                                                                                        |                                                                                                                                                         |  | Hipóteses                                                                                                                                                  |  |  |                                                                                                                                                             |  |  |  |
| Políticas públicas para eficiência energética de motores elétricos novos (PEEE)                                                                  | Baixa efetividade                                                                                                                                       |  | Efetividade moderada                                                                                                                                       |  |  | Alta efetividade                                                                                                                                            |  |  |  |
| Política de desempenho energético dos motores elétricos (MEPS)                                                                                   | Mínimo IR3 com abrangência parcial. Fiscalização limitada da venda de motores reconicionados.                                                           |  | Migração para padrões IR3/IR4 com abrangência crescente. Fiscalização moderada da venda de motores reconicionados.                                         |  |  | Padrões muito rigorosos (>IR4) obrigatórios. Exigência IR4/IR5 com inversor de frequência. Fiscalização rigorosa da venda de motores reconicionados.        |  |  |  |
| Inovação tecnológica e de processos do segmento de motores elétricos (INOV)                                                                      | Taxa moderada de inovação; restrita a motores novos.                                                                                                    |  | Taxa moderada de inovação; para motores novos e para alguns processos dos motores reconicionados.                                                          |  |  | Alta taxa de inovação para motores novos e para maior parte dos processos dos motores reconicionados.                                                       |  |  |  |
| Custo comparativo entre motores novos e reconicionados (CUST)                                                                                    | Custo muito alto de motores novos e eficientes.                                                                                                         |  | Custo alto de motores novos e eficientes.                                                                                                                  |  |  | Custo moderado de motores novos e eficientes.                                                                                                               |  |  |  |
| Taxa de adoção de tecnologias inovadoras nos serviços de reconicionamento de motores elétricos (INRC)                                            | Baixa adoção de tecnologias. Uso de equipamentos básicos. Certificação mínima.                                                                          |  | Adoção moderada e seletiva. Adoção de tecnologias básicas (estufa, por exemplo). Certificação parcial.                                                     |  |  | Adoção ampla de tecnologias avançadas. Automação e controle precisos. Certificação completa.                                                                |  |  |  |
| Nível de conscientização e percepção por parte das empresas do setor industrial sobre motores elétricos reconicionados (CPRC)                    | Pouco conhecimento sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados escassos sobre o desempenho dos motores reconicionados. |  | Conhecimento parcial sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados limitados sobre o desempenho dos motores reconicionados. |  |  | Conhecimento técnico sobre os reais impactos dos motores reconicionados de baixa qualidade. Dados confiáveis sobre o desempenho dos motores reconicionados. |  |  |  |
| Participação de motores elétricos novos de alta eficiência, reconicionados e importados de baixa eficiência no setor industrial no Brasil (MERC) | Novos: 50 %; Reconicionados: 35 %; Importados BQ: 15 %.<br>Sem controle do mercado de reconicionados e importados BQ.                                   |  | Novos: 60 %; Reconicionados: 30 %; Importados BQ: 10 %.<br>Controle razoável do mercado de reconicionados e importados BQ.                                 |  |  | Novos: 70 %; Reconicionados: 25 %; Importados BQ: 5 %.<br>Controle mais rigoroso do mercado de reconicionados e importados BQ.                              |  |  |  |
| Preço de energia elétrica no Brasil (PREC)                                                                                                       | Muito baixo                                                                                                                                             |  | Baixo                                                                                                                                                      |  |  | Alto                                                                                                                                                        |  |  |  |
| Potencial de extensão da vida útil de motores usados (VIDA)                                                                                      | Potencial limitado. 3-5 anos adicionais. Desempenho reduzido.                                                                                           |  | Potencial moderado com boas práticas. 5-7 anos adicionais. Desempenho mantido. Confiabilidade média.                                                       |  |  | Alto potencial com tecnologias avançadas. 8 ou mais anos adicionais - Desempenho mantido. Confiabilidade alta.                                              |  |  |  |
| Efeito rebote resultante da EE de motores elétricos de uso industrial (REBE)                                                                     | Efeito rebote baixo                                                                                                                                     |  | Efeito rebote moderado                                                                                                                                     |  |  | Efeito rebote alto                                                                                                                                          |  |  |  |
| Energia conservada (ENCO)                                                                                                                        | 0 – 5 %                                                                                                                                                 |  | 5 – 10 %                                                                                                                                                   |  |  | 10 – 15 %                                                                                                                                                   |  |  |  |

Figura 4.7 — Matriz morfológica referente ao Cenário 4: 'Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável'

### **Cenário 1: Regulamentação seletiva**

Neste cenário, as políticas públicas para eficiência energética de motores (PEEE) e as normas de desempenho energético (MEPS) permanecem de baixa efetividade, restritas a poucas iniciativas pontuais e com fiscalização limitada. O preço da energia elétrica (PREC) se mantém moderado, reduzindo incentivos econômicos à eficiência. A inovação tecnológica (INOV) avança lentamente e se concentra em poucos fabricantes de motores novos, com baixa difusão a recondiçionamentos.

O impacto sobre a redução do consumo energético e das emissões de GEE é pequeno, ou seja, a energia conservada (ENCO) não ultrapassa 5 % e o potencial de extensão da vida útil dos motores (VIDA) é limitado a poucos anos adicionais, com desempenho abaixo do ideal. A modernização do parque industrial fica restrita, dificultando avanços setoriais expressivos.

Os efeitos rebote (REBE) neste contexto são extremamente baixos ou até inexistentes (0-5 %), pois as limitações econômicas e regulatórias impedem que os ganhos de eficiência se traduzam em aumento na produção ou uso intensivo. Assim, medidas mitigadoras se concentram em sobrevivência das empresas, e recomendações envolvem a construção de bases institucionais para políticas integradas e o fortalecimento do marco regulatório como pré-condição para maior eficiência no futuro.

#### **Tipos e intensidades dos efeitos rebote no cenário 1**

No plano direto, os ganhos de eficiência energética alcançados são mínimos e, quando ocorrem, se destinam exclusivamente à redução de custos operacionais, resultando em efeitos rebote diretos entre 0 % e 5 %. Os efeitos indiretos permanecem igualmente baixos, restringindo-se à faixa de 0–5 %, já que a estagnação tecnológica no setor de motores limita o aproveitamento dos benefícios da eficiência para atividades expansivas. De modo geral, é possível observar um efeito “anti-rebote”, considerando que o dinamismo econômico insuficiente impede qualquer efeito multiplicador sobre o consumo de energia, resultando até mesmo em redução do consumo absoluto.

#### **Fatores mitigadores dos efeitos rebote no cenário 1**

As restrições econômicas estruturais que permeiam este cenário funcionam como os principais freios ao efeito rebote. O pouco espaço para crescimento e

inovação faz com que possíveis economias de energia sejam integralmente absorvidas pela necessidade de sobrevivência financeira das empresas, não havendo estímulo para reinvestimentos que poderiam ampliar o consumo energético. A baixa penetração de tecnologias inovadoras e a limitada percepção sobre a qualidade de motores reconicionados reforçam uma postura defensiva no setor industrial. Da mesma forma, a ausência de políticas setoriais integradas desestimula sinergias que potencializariam benefícios sistêmicos maiores.

### **Fatores agravantes da baixa efetividade das políticas públicas no cenário 1**

Por outro lado, destacam-se agravantes que perpetuam a baixa efetividade das políticas públicas e o ciclo de ineficiência. A fragmentação do mercado e a elevada participação de motores importados de baixa eficiência impedem ganhos de escala e dificultam a disseminação de melhores práticas. Tarifas de energia em patamares baixos removem possíveis incentivos para mudanças comportamentais, enquanto a limitada oferta de financiamento restringe ainda mais as possibilidades de modernização industrial. Ademais, a desconfiança predominante em relação a motores reconicionados limita as opções viáveis para os gestores industriais, mantendo elevados os custos das soluções verdadeiramente eficientes.

### **Cenário 2: Transição regulatória**

Neste contexto, observa-se evolução moderada e progressiva das políticas públicas (PEEE) e das exigências normativas (MEPS), com expansão da fiscalização e dos incentivos. O preço da energia elétrica (PREC) se mantém moderado, estimulando interesse empresarial em eficiência. Inovação tecnológica (INOV) avança em motores novos e começa a alcançar parte dos serviços de recondicionamento.

Os ganhos na redução do consumo energético e emissões são relevantes, com energia conservada (ENCO) variando entre 5 – 10 % e extensão de vida útil (VIDA) adequada mediante boas práticas. Empresas realizam substituições graduais e passam a aproveitar parte dos ganhos de eficiência para expandir produção, criando efeito rebote moderado (5–15 %).

A inovação impacta na introdução de novas práticas e tecnologias, embora a difusão ainda seja desigual. A mitigação dos potenciais efeitos rebote depende de políticas de monitoramento do efeito rebote, incentivo à inovação e educação dos

gestores industriais. Recomenda-se intensificar políticas integradas e aprimorar os mecanismos de rastreabilidade e fiscalização, visando evitar que parte dos ganhos se perca em aumento de consumo ligado à demanda reprimida.

### **Tipos e intensidades dos efeitos rebote no cenário 2**

Nesse contexto, os efeitos rebote atingem intensidade moderada. Os efeitos diretos situam-se na faixa de 5 – 15 %, refletindo que uma proporção dos ganhos de eficiência é direcionada à ampliação da capacidade de uso e de produção dos equipamentos. Os efeitos indiretos, por seu turno, têm magnitude semelhante (5–15 %), já que a elevação da inovação tecnológica favorece a disseminação de práticas mais eficientes no setor de recondicionamento, expandindo sua participação de mercado de modo gradual. Globalmente, o efeito rebote sistêmico atinge patamares entre 5 % e 15 %, em virtude de avanços constantes mas controlados do PIB industrial e uma adoção seletiva de soluções eficientes.

### **Fatores mitigadores dos efeitos rebote no cenário 2**

Os principais fatores mitigadores vêm do próprio desenho das políticas: com efetividade moderada, as normas conseguem equilibrar incentivos à modernização e ao mesmo tempo evitam desequilíbrios e choques abruptos, promovendo eficiência sem impulsionar expansão excessiva da demanda. O avanço gradual dos padrões MEPS e a progressiva adoção de tecnologias inovadoras permitem que as empresas internalizem práticas de gestão energética e automação sem custos excessivos, diluindo o risco de efeito rebote intenso. Além disso, a manutenção dos preços de energia em patamares moderados restringe incentivos para aumentos exacerbados de consumo, enquanto uma abordagem cautelosa na renovação do parque fabril favorece o equilíbrio entre eficiência e expansão.

### **Fatores agravantes dos efeitos rebote no cenário 2**

Por outro lado, o crescimento econômico estável e o aprimoramento das competências industriais facilitam a reinversão de recursos em produtividade e, portanto, propiciam aumento parcial da demanda energética. O barateamento progressivo dos motores eficientes e a profissionalização crescente da cadeia de recondicionamento ampliam oportunidades de uso intensivo dos equipamentos. Assim, embora os efeitos rebote sejam menores do que num cenário de expansão acelerada, parte dos ganhos acaba sendo absorvida por aumentos de produção e uso prolongado das máquinas, reduzindo o impacto líquido em termos de conservação

de energia.

### **Cenário 3: Regulamentação rigorosa com paradoxo**

Políticas públicas (PEEE) e normas técnicas (MEPS) atingem alta efetividade, com fiscalização rigorosa e padrões muito elevados (IE4/IE5). O preço da energia (PREC) mantém-se moderado, tornando economicamente vantajosa a modernização. A inovação tecnológica (INOV) é intensa, redesenhando tanto a produção de motores novos quanto o recondicionamento, criando um cenário altamente tecnológico.

Apesar disso, o impacto sobre o consumo energético e emissões é aparentemente contraditório: a energia conservada (ENCO) pode atingir patamares entre 5 – 15 %, e a vida útil dos motores (VIDA) é extensível por muitos anos, mas o efeito rebote (REBE) é alto (15 – 30 %). O resultado é que quase todos os ganhos de eficiência acabam convertidos em crescimento da produção e aumento do consumo agregado, em função da expansão industrial e do uso massivo de equipamentos eficientes.

A inovação torna-se vetor do crescimento, mas sem políticas complementares — como limites para consumo, precificação de carbono ou monitoramento ambiental integrado — o efeito rebote praticamente anula os ganhos ambientais setoriais. Recomenda-se adoção de instrumentos econômicos e regulatórios específicos para efeito rebote, bem como programas de reinvestimento dos ganhos de eficiência em energia limpa e tecnologias baixo carbono (*low-carbon*), não apenas expansão produtiva.

### **Tipos e intensidades dos efeitos rebote no cenário 3**

Neste contexto, a intensidade dos efeitos rebote é máxima. Os efeitos diretos oscilam entre 15 % e 30 %, já que as empresas rapidamente absorvem os ganhos de eficiência em operações mais intensas e produtivas. Os efeitos indiretos, por sua vez, atingem de 15 % a 20 %, em razão do ciclo virtuoso de inovação e expansão acelerada que caracteriza o setor. O efeito rebote sistêmico pode chegar a níveis críticos (80–100 %), anulando por completo os ganhos inicialmente previstos pelo aumento da eficiência energética — fenômeno clássico do Paradoxo de Jevons, em que o total de energia consumida cresce junto com a expansão industrial, mesmo com o uso de tecnologias mais eficientes.

### **Fatores mitigadores dos efeitos rebote no cenário 3**

Neste cenário, os fatores mitigadores são praticamente inexistentes. As próprias políticas públicas, embora extremamente eficazes do ponto de vista técnico, falham ao não criar barreiras para a canalização dos ganhos de eficiência rumo à expansão produtiva desenfreada. Não existem instrumentos econômicos para restringir ou condicionar o uso das economias obtidas, como limites absolutos para emissões, precificação de carbono ou mecanismos de cap-and-trade, o que permite às empresas reinvestir livremente todos os benefícios da eficiência em novas atividades e aumento da produção.

### **Fatores agravantes dos efeitos rebote no cenário 3**

O principal agravante desse cenário é justamente o sucesso das políticas públicas no seu objetivo primeiro (modernização e aumento da eficiência), combinado ao ambiente setorial de alta liquidez para investimentos e à rápida difusão de soluções tecnológicas. O alto potencial de extensão de vida útil dos motores, aliado à massificação de práticas de condicionamento e padrões rigorosos de qualidade, amplia o ciclo de renovação e uso das máquinas de forma contínua. Preços de energia moderado funcionam, paradoxalmente, como incentivo adicional para que todo ganho em eficiência se reverta rapidamente em expansão econômica ao invés de resultar em real conservação de energia.

### **Cenário 4: Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável**

Este é o cenário de máxima convergência entre política institucional (PEEE), rigor normativo (MEPS), preço baixo de energia (PREC) e inovação tecnológica (INOV) orientada à sustentabilidade. Todas as ferramentas atuam de modo articulado, incluindo instrumentos econômicos com precificação de carbono e incentivos a circularidade e energia renovável.

A redução de consumo energético é robusta (ENCO 15 – 30 %, podendo superar este patamar), e a extensão da vida útil (VIDA) dos motores é otimizada via processos inovadores de condicionamento. O efeito rebote (REBE), embora presente, é mantido em patamares controlados (5–15 %) graças a políticas complementares que direcionam parte dos ganhos à mitigação de emissões, sustentabilidade e reinvestimento em tecnologia limpa.

### **Tipos e intensidades dos efeitos rebote no cenário 4**

Neste contexto, os efeitos rebote são rigorosamente controlados nos

diferentes níveis. Os efeitos diretos permanecem em patamares baixos a moderados (5–15 %) pela presença combinada de incentivos públicos e instrumentos de mercado que aumentam o custo real de uso da energia, mesmo diante de ganhos de eficiência. Os efeitos indiretos são igualmente moderados (5–15 %), já que boa parte dos benefícios obtidos é direcionada a investimentos em tecnologias limpas, automação e digitalização que não implicam, necessariamente, aumento do consumo absoluto de energia. O efeito rebote sistêmico é efetiva e sistematicamente limitado entre 5 % e 15 %, pois ganhos em eficiência são convertidos em sustentabilidade global e não se perdem na ampliação indiscriminada do consumo energético.

#### **Fatores mitigadores dos efeitos rebote no cenário 4**

Instrumentos econômicos articulados, como precificação de carbono e incentivos para empresas de melhor desempenho ambiental, são a base da estratégia de mitigação, assegurando que externalidades negativas sejam devidamente internalizadas. Políticas complementares — abrangendo incentivos à economia circular, inovação sustentável, automação e renováveis — direcionam os ganhos de eficiência para o desenvolvimento tecnológico alinhado com desempenho ambiental. Limites absolutos de emissões e sistemas avançados de monitoramento, aliados a exigências de certificação e transparência, garantem o cumprimento efetivo das metas climáticas do setor industrial.

#### **Fatores sistêmicos de equilíbrio sustentável no cenário 4**

O cenário é sustentado por tarifas de energia estratificadas, políticas de *feedback* e auditorias recorrentes, que mantêm incentivos alinhados ao desempenho sustentável sem estimular aumento de consumo. Empresas líderes são recompensadas financeiramente e prestigiadas publicamente, estimulando competição virtuosa por desempenho energético e ambiental. A inovação é consistentemente orientada à sustentabilidade, reduzindo o risco de efeito rebote estrutural.

#### **Desafios da implementação da regulamentação no cenário 4**

Apesar do desenho institucional robusto, desafios relevantes de implementação permanecem. O principal obstáculo é calibrar instrumentos econômicos para evitar restrições excessivas ao crescimento industrial legítimo e

garantir aceitação pelo setor produtivo. A precificação do carbono, por exemplo, deve ser suficientemente alta para influenciar decisões empresariais, mas sem comprometer a competitividade internacional. Outro desafio é assegurar coordenação entre as múltiplas esferas governamentais e atores setoriais, bem como garantir investimentos públicos necessários em regulação, monitoramento e atualização tecnológica. Por fim, a transição justa requer flexibilidade temporal e acesso democrático a inovação, para que todos os subsectores industriais possam evoluir rumo à sustentabilidade alinhando performance ambiental e competitividade econômica.

A análise dos quatro cenários revelou que os efeitos rebote em eficiência energética de motores industriais no Brasil variam drasticamente conforme o contexto econômico, tecnológico e regulatório. Enquanto a estagnação tecnológica minimiza efeito rebote através da limitação econômica, a transformação acelerada pode eliminar completamente os ganhos esperados de eficiência energética.

O cenário de equilíbrio sustentável demonstra que políticas integradas podem efetivamente controlar efeitos rebote, mas requerem sofisticação regulatória e instrumentos econômicos coordenados. A escolha da trajetória política determinará se os investimentos em eficiência energética de motores industriais contribuirão efetivamente para os objetivos climáticos do Brasil até 2050.

#### **4.2.**

#### **Resultados do módulo de dinâmica de sistemas integrada à prospectiva estratégica**

A implementação do módulo de dinâmica de sistemas integrada à prospectiva estratégica gerou resultados quantitativos que confirmam empiricamente a variabilidade dos efeitos rebote conforme diferentes contextos político-institucionais projetados para o Brasil até 2050. A modelagem matemática, fundamentada nas equações desenvolvidas na Seção 3.3, traduziu as hipóteses qualitativas dos quatro cenários prospectivos em trajetórias numéricas precisas, revelando padrões diferenciados de conservação energética e manifestação dos efeitos rebote.

Os resultados demonstram que a magnitude dos efeitos rebote oscila dramaticamente entre 6 % no cenário 1 ('Regulamentação seletiva') e 85 % no cenário 3 ('Regulamentação rigorosa com paradoxo'), validando teoricamente o Paradoxo de Jevons e evidenciando que políticas similares podem produzir

consequências radicalmente distintas. A análise temporal revela dinâmicas não-lineares, com períodos de aceleração dos efeitos rebote durante fases de transição tecnológica (2025-2035) e possível estabilização em patamares diferenciados nas décadas seguintes.

A decomposição por tipos de efeitos rebote (direto, indireto, macroeconômico e comportamental) identificou que efeitos diretos predominam em cenários de baixa regulamentação, enquanto efeitos macroeconômicos intensificam-se em contextos de modernização acelerada. O benefício energético líquido, calculado como energia conservada menos energia “perdida” pelos efeitos rebote, variou entre 7 % e 32 % conforme o cenário, demonstrando que a efetividade real das políticas de eficiência energética depende criticamente da capacidade de controlar mecanismos compensatórios.

A validação comportamental do modelo por meio de dados históricos disponíveis mostra robustez das projeções, enquanto a análise de sensibilidade evidencia que fatores relacionados à estrutura de custos e preços de energia exercem influência determinante na magnitude dos resultados, orientando estratégias para a maximização dos benefícios líquidos da eficiência energética no contexto industrial brasileiro.

#### **4.2.1.**

##### **Modelo da dinâmica sistêmica da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil**

Com base na análise estrutural das variáveis-chave e suas interações, identificaram-se os seguintes ciclos principais de retroalimentação, classificados em ciclos de reforço R (*reinforcement loops*) e ciclos de equilíbrio B (*balance loops*) na Figura 4.8.

O modelo CLD (*Causal Loop Diagram*) na Figura 4.8 representa a dinâmica sistêmica da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil, com foco nas variáveis-chave que influenciam a aquisição de equipamentos mais eficientes pela indústria (MERC).

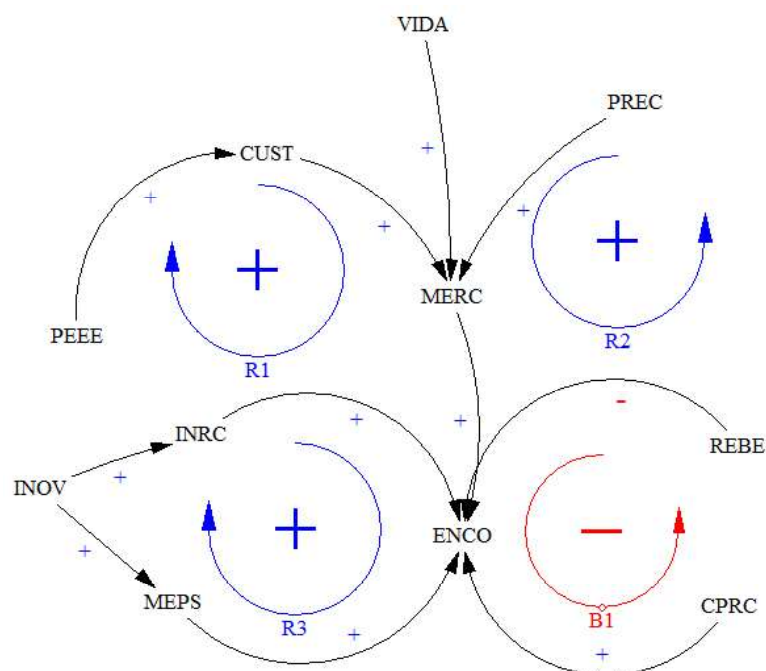


Figura 4.8 – Diagrama de retroalimentação CLD no modelo da dinâmica sistêmica da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil

O diagrama evidencia as interações sistêmicas entre variáveis-chave como inovação tecnológica (INOV), custo (CUST), preço da energia elétrica (PREC) e políticas públicas (MEPS, PEEE), representando o papel estrutural de cada elemento na dinâmica da eficiência energética industrial. Os ciclos de reforço (+R1 a +R3) traduzem mecanismos dinâmicos que impulsionam a adoção de motores eficientes — tais como a ampliação do acesso tecnológico e a redução de custos — ao passo que o ciclo de balanceamento (-B1) expõe as resistências sistêmicas à mudança, com destaque para o efeito rebote (REBE), fenômeno identificado como limitador dos ganhos líquidos previstos pelas intervenções em eficiência energética (Brockway et al., 2021; Guzzo et al., 2024).

O modelo torna explícito como políticas públicas, avanços tecnológicos e variáveis de mercado se articulam em ciclos recursivos, moldando as trajetórias da eficiência dos motores elétricos industriais no Brasil até 2050 sob os diferentes cenários prospectivos desenvolvidos.

A Figura 4.9 ilustra o modelo completo de dinâmica sistêmica construído no ambiente Vensim®, integrando as variáveis-chave selecionadas nos exercícios de cenarização. Por meio desta modelagem, foi possível simular a evolução temporal do sistema segundo as interdependências entre políticas públicas, desenvolvimento tecnológico, estrutura de custos, percepção empresarial e manifestação do efeito rebote.

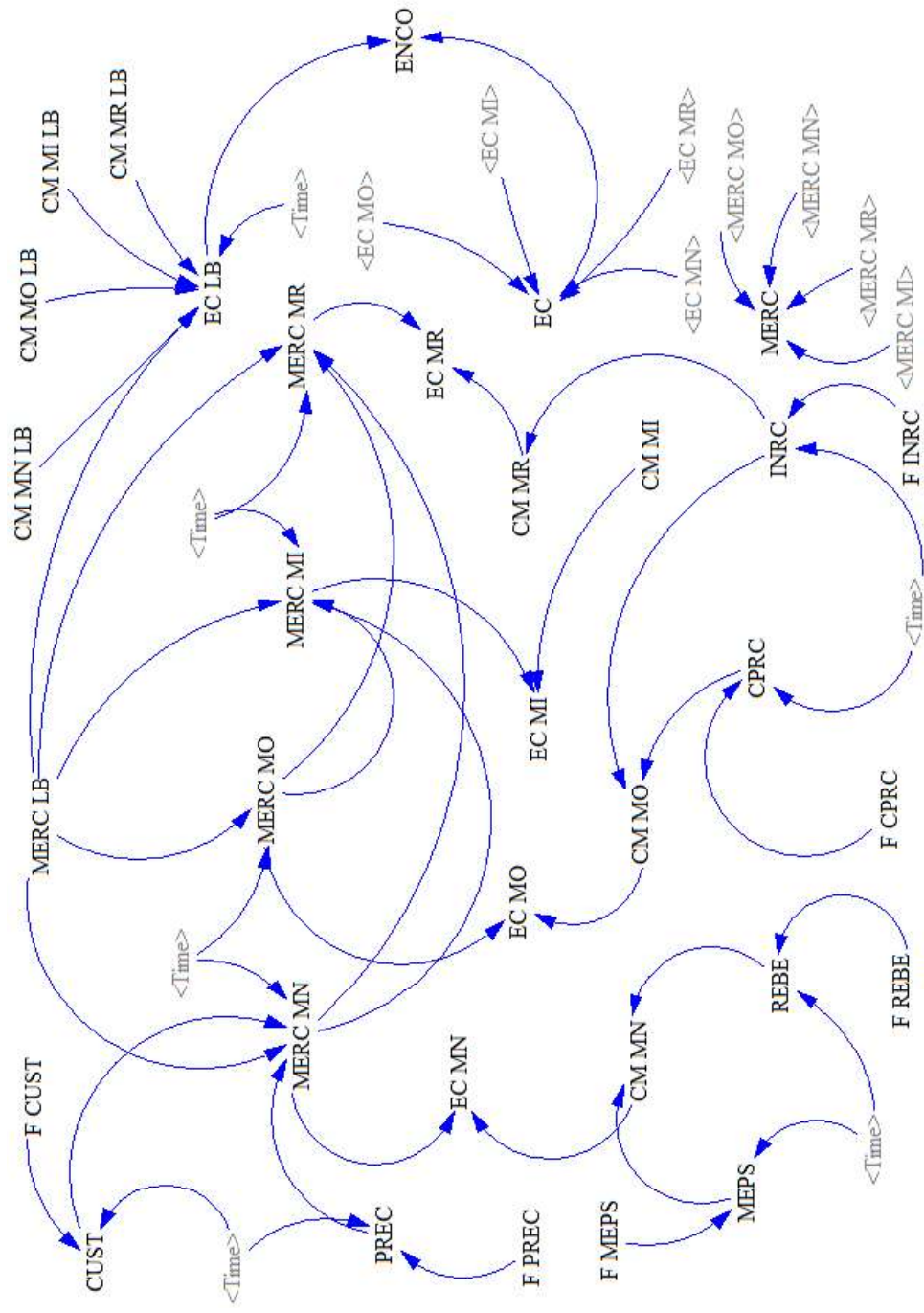


Figura 4.9 – Modelo completo da dinâmica sistêmica da eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil

As equações associadas às variáveis-chave do modelo apresentadas na Seção 3.3 do capítulo anterior foram calibradas com dados históricos e projeções econômicas robustas, assegurando aderência empírica e permitindo estimativas fidedignas do consumo energético e da dinâmica do mercado de motores (Sterman, 2000; Fortes et al., 2020).

Como se observa na Figura 4.9, apesar da importância teórica das variáveis INOV, VIDA e PEEE, estas não foram incorporadas ao modelo dinâmico final. Essa exclusão decorreu da ausência de impacto estatisticamente significativo sobre os resultados das simulações, conforme evidenciado nas etapas de validação comportamental do modelo. No caso da extensão da vida útil dos motores (VIDA), a principal limitação residiu na indisponibilidade de dados suficientes, atualizados e padronizados para sua parametrização precisa, além da extrema variabilidade decorrente dos fatores operacionais e técnicos envolvidos — condição que inviabilizou sua representação agregada (Vieira, 2018).

Para a variável-chave INOV, os testes mostraram que seus efeitos já estavam suficientemente capturados por outras variáveis agregadas, a exemplo das ações normativas (MEPS) e das inovações nos processos de recondicionamento (INRC), ambas com impacto direto e mensurável sobre o consumo energético médio do parque instalado. Por essa razão, optou-se por não promover duplicidade na estrutura causal do modelo.

No tocante à variável-chave PEEE, adotou-se como hipótese a implementação fixa e contínua das políticas públicas, sem previsão de mudanças institucionais significativas no horizonte considerado. Tal escolha levou a um comportamento estático desta variável-chave, sem a geração de retroalimentações sistêmicas relevantes ao longo do tempo.

Finalmente, em virtude das limitações técnicas do ambiente Vensim® para nomenclatura textual e simbólica, não foi possível empregar a mesma notação das equações apresentadas na Subseção 3.3 do capítulo anterior. Para garantir a clareza conceitual e a rastreabilidade dos elementos modelados, apresenta-se, a seguir, um exemplo ilustrativo da correspondência entre as variáveis declaradas no *software* e aquelas formuladas no Capítulo 3 desta dissertação.

- Variável declarada na Subseção 3.3:  $CM_{MNLB}$
- Variável declarada no software Vensim®:  $CM\ MN\ LB$

#### 4.2.2. Determinação da linha de base

A determinação da linha de base constitui fundamento indispensável para quaisquer análises comparativas dos cenários prospectivos modelados. Utilizou-se a série histórica do mercado brasileiro de motores elétricos industriais projetada por Micerino (2012), em consonância com o crescimento superior do PIB previsto no Plano Nacional de Energia 2050 (BrasiL, 2020).

O ajuste empírico adotou regressão linear com intercepto nulo, validando-se a robustez da projeção pela estatística  $R^2$  elevada (Figura 4.10). A Equação 2 apresentada na Seção 3.3 foi empregada para o cálculo do mercado total de motores elétricos industriais no Brasil.

A distribuição percentual dos diferentes tipos de motores para a linha de base seguiu parâmetros obtidos em Vieira (2018), como detalhado anteriormente. Para cada ano  $t$ , os totais de motores novos, importados de baixa qualidade, em operação e recondicionados foram desagregados conforme participação percentual histórica — registros explicitados ao longo da Figura 4.10.

A estimativa do número de motores que compõem a linha de base do mercado brasileiro de motores elétricos industriais ( $MERC_{LB}(t)$ ) foi obtida a partir dos procedimentos metodológicos descritos na Seção 3.3. A série histórica referente a esse mercado foi fundamentada na projeção elaborada por Micerino (2012).

Para representar o crescimento econômico, adotou-se o cenário superior do Plano Nacional de Energia 2050, elaborado pelo MME e EPE (Brasil, 2020), que prevê uma taxa média anual de expansão do PIB de 3,1 %. Os parâmetros estatísticos derivados da análise de regressão linear, conduzida no *software* MS Excel, encontram-se sintetizados na Tabela 4.1. O intercepto foi fixado em zero, uma vez que a primeira estimativa resultou em valores negativos.

Tabela 4.1 – Parâmetros estatísticos para a projeção do mercado de motores elétricos industriais

| Parâmetros estatísticos            | Valores calculados                                                                                    |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nível de confiança                 | 95 %                                                                                                  |
| Coeficientes da equação            |                                                                                                       |
| $\alpha$ (inclinação)              | 48325,32                                                                                              |
| $\beta$ (intercepto)               | 0                                                                                                     |
| Equação                            | $F(t)=\alpha(\text{PIB}(t))+\beta$                                                                    |
| Erro padrão (SE)                   | 1.595.134,22                                                                                          |
| $R^2$                              | 0,9905                                                                                                |
| $R^2$ ajustado                     | 0,8996                                                                                                |
| Estatística F e graus de liberdade | 1144,52 (gl = 1;11)                                                                                   |
| F de significação                  | $1.20409 \times 10^{-11}$                                                                             |
| Soma dos quadrados                 | Regressão = $2,91 \times 10^{15}$<br>Resíduo = $2,80 \times 10^{13}$<br>Total = $2,94 \times 10^{15}$ |
| t-estatística para parâmetros      | 33,83 (coeficiente principal)                                                                         |
| Valor-p                            | $1,80 \times 10^{-12}$                                                                                |
| Intervalo de confiança 95 %        | [45.181,35 ; 51.469,30]                                                                               |

A Figura 4.10, a seguir, apresenta a projeção do mercado de motores elétricos industriais no Brasil até o ano de 2050.

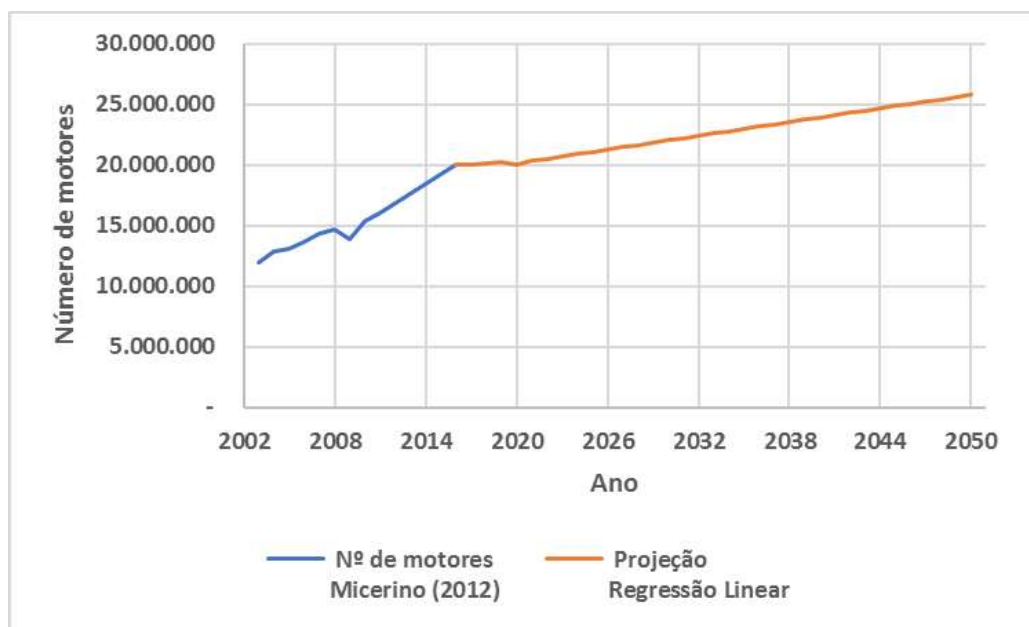


Figura 4.10 – Projeção do número de motores elétricos industriais no Brasil até 2050

Com base nos resultados apresentados por Vieira (2018), referentes ao ano de 2016, a participação de mercado dos diferentes tipos de motores foi distribuída da seguinte forma: 13,55 % correspondem a motores novos, 72,76 % a motores em operação, 3,41 % a motores importados de baixa qualidade e 10,27 % a motores

recondicionados, compondo, em conjunto, a estrutura do  $MERC_{LB}(t)$  do setor. Ao estender esses valores para a projeção até 2050, obtêm-se as estimativas correspondentes a cada categoria de motor em todos os anos do período ( $MN_{LB}(t)$ ,  $MI_{LB}(t)$ ,  $MO_{LB}(t)$ ,  $MR_{LB}(t)$ ) a partir de 2025 (Figura 4.11).

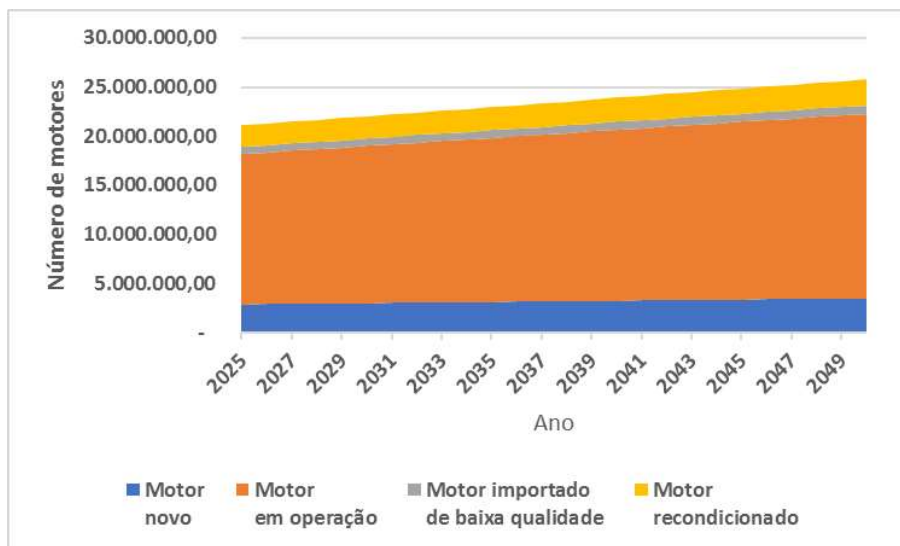


Figura 4.11 – Projeções do mercado de motores elétricos industriais no Brasil por categoria de motores elétricos industriais

Para determinar o consumo médio de energia elétrica de cada categoria de motor ( $CM_{MN_{LB}}$ ,  $CM_{MI_{LB}}$ ,  $CM_{MO_{LB}}$ ,  $CM_{MR_{LB}}$ ), foram utilizados os dados específicos de consumo energético de cada grupo de motores. Conforme Vieira (2018), em 2016 o consumo total de energia elétrica associado aos motores recondicionados foi de 13,99 TWh, considerando um parque de 2.051.331 unidades de motores. Esse valor corresponde a um consumo médio de energia elétrica de aproximadamente 6,82 MWh por motor recondicionado. Aplicando a mesma metodologia de cálculo aos demais grupos, obtêm-se os respectivos consumos médios de energia elétrica por unidade de cada tipo de motor, os quais estão sistematizados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Estimativa do consumo médio/motor da linha de base

| Mercado de motores                 | Consumo (TWh) | Quantidade de motores | Consumo médio (MWh) | Fonte         |
|------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------------|---------------|
| Motor recondicionado               | 13,99         | 2.051.331             | 6,82                | Vieira (2018) |
| Motor novo                         | 17,45         | 2.707.895             | 6,44                |               |
| Motor importado de baixa qualidade | 4,54          | 682.019               | 6,66                |               |
| Motor em operação                  | 97,67         | 14.537.602            | 6,72                |               |
| Total                              | 133,65        | 19.978.847            | -                   |               |

Cabe ressaltar que a maior parcela dos motores elétricos industriais no Brasil ainda se concentra em equipamentos com baixos índices de eficiência, sobretudo reconicionados e em operação, o que determina a base de comparação para ganhos futuros.

Com base no consumo médio de energia elétrica de cada tipo de motor e na respectiva participação de mercado anual, foi possível estimar o consumo de energia elétrica individual por categoria e o total demandado pelo conjunto do mercado em cada ano até 2050, utilizando a Equação 3 definida na Seção 3.3.

Dessa forma, projeta-se o consumo de energia elétrica dos motores industriais no Brasil ( $EC_{LB}(t)$ ), conforme ilustrado na Figura 4.12.

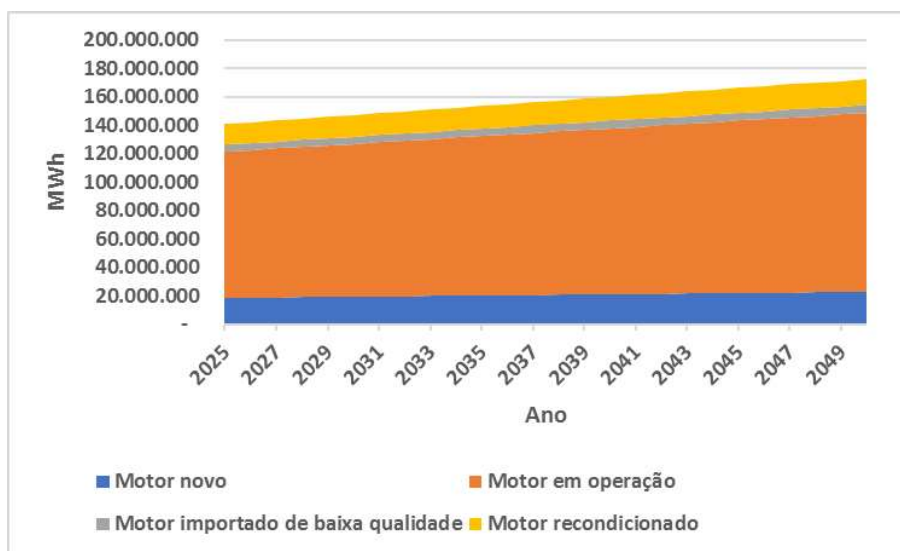


Figura 4.12 – Consumo de energia elétrica dos motores elétricos industriais no Brasil até 2050

#### 4.2.3.

#### Configuração dos parâmetros do modelo dinâmico prospectivo

Após a definição dos valores da linha de base, procedeu-se à parametrização das variáveis-chave do modelo. Essa etapa foi conduzida com base em discussões técnicas com especialistas da área e em estimativas empíricas previamente levantadas, alinhadas aos cenários prospectivos definidos. No entanto, destaca-se a necessidade de validação adicional desses parâmetros, seja por meio de revisão da literatura especializada, seja por consultas mais abrangentes a profissionais envolvidos diretamente com o planejamento energético. Os valores atribuídos aos fatores que influenciam o comportamento do modelo estão sistematizados nas Tabelas 4.3 a 4.6, sendo apresentados de forma individualizada para cada cenário

analisado.

Em alguns períodos, observa-se uma alteração nos valores dos parâmetros do modelo, atribuída à intensificação da difusão tecnológica. Em 2030 e 2040, os ajustes refletem a incorporação progressiva de inovações tecnológicas, conforme evidenciado pelos valores específicos atribuídos aos fatores modelados. A partir de 2050, estabelece-se um cenário autônomo de difusão tecnológica, no qual os avanços passam a ocorrer de forma endógena ao sistema modelado, sem a necessidade de intervenções externas adicionais. Essa transição representa uma mudança estrutural no comportamento do modelo, com implicações diretas sobre os resultados projetados.

### **Cenário 1: Regulamentação seletiva**

$F_{MEPS_{C1}}(t)$ : O fator referente às políticas de desempenho energético (MEPS) permanece em 0,00 % ao longo dos anos iniciais (2025–2029), refletindo a hipótese de "utilização de no mínimo motores IR3 com abrangência parcial e fiscalização limitada". A ausência de crescimento neste fator indica estagnação regulatória, corroborando o cenário que aponta baixa efetividade das políticas públicas (PEEE).

$F_{PREC_{C1}}(t)$ : O fator do preço da energia elétrica se mantém em 2,0%, valor moderado que reduz incentivos econômicos à adoção de tecnologias eficientes. Isso está alinhado com a hipótese de "PREC muito baixo", que limita a viabilidade econômica de investimentos em motores de alta eficiência.

$F_{CUST_{C1}}(t)$ : O fator de custo comparativo entre motores novos e reconicionados é 0,0 %, indicando que o custo dos motores novos permanece elevado, conforme a hipótese de "custo muito alto para novos eficientes". Isso desestimula a substituição de motores antigos e reforça a baixa taxa de modernização do parque industrial.

$F_{INRC_{C1}}(t)$  e  $F_{CPRC_{C1}}(t)$ : Ambos os fatores apresentam valores iniciais de 0,0 % em 2025. Esses valores extremamente baixos indicam uma adoção incipiente de tecnologias inovadoras nos serviços de recondicionamento (INRC) e uma percepção limitada por parte das empresas (CPRC). Isso está em consonância com as hipóteses de "baixa adoção seletiva" e "pouco conhecimento sobre impactos reais".

$F_{REBE_{C1}}(t)$ : O fator do efeito rebote acumulado no período é de 2,6 %, o

que confirma a hipótese de "efeito rebote médio" ou praticamente inexistente (0–5 %), como descrito no cenário 1. A baixa efetividade das políticas e o custo elevado impedem que os ganhos de eficiência se traduzam em aumento de produção ou uso intensivo.

A convergência entre os fatores quantitativos e as hipóteses qualitativas revela um cenário de baixa transformação estrutural. A ausência de políticas robustas e incentivos econômicos impede a difusão de tecnologias eficientes, limitando os ganhos energéticos e ambientais. A modernização do parque industrial é comprometida, e o setor permanece dependente de motores reconicionados com baixa eficiência. O efeito rebote, praticamente inexistente, indica que os ganhos de eficiência não são suficientes para estimular o crescimento produtivo, reforçando a estagnação tecnológica.

Os valores atribuídos aos fatores refletem uma realidade institucional e econômica limitada. A baixa efetividade das políticas públicas (MEPS) justifica os valores nulos ou mínimos nos fatores correspondentes. O preço moderado da energia elétrica (PREC) não cria pressão suficiente para a adoção de tecnologias mais eficientes, enquanto os altos custos dos motores novos (CUST) mantêm o mercado estagnado.

A baixa percepção empresarial (CPRC) e a adoção incipiente de inovação nos reconicionamentos (INRC) são justificadas pela ausência de incentivos, certificações e dados confiáveis sobre desempenho. O efeito rebote (REBE) permanece baixo devido à falta de estímulos econômicos e regulatórios que poderiam transformar ganhos de eficiência em aumento de produção.

Tabela 4.3 – Fatores das variáveis-chave do modelo no cenário 1: Regulamentação seletiva

| ( <i>t</i> )       | [2025 – 2029[ | [2030 – 2034[ | [2035 – 2039[ | [2040 – 2044[ | [2045 – 2050] |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $F_{CUST_{c1}(t)}$ | 0,0 %         | 0,0 %         | 0,0 %         | 0,0 %         | 0,0 %         |
| $F_{PREC_{c1}(t)}$ | 2,0 %         | 2,0 %         | 2,0 %         | 2,0 %         | 2,0 %         |
| $F_{MEPS_{c1}(t)}$ | 0,0 %         | 0,05 %        | 0,05 %        | 0,1 %         | 0,1 %         |
| $F_{REBE_{c1}(t)}$ | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         |
| $F_{CPRC_{c1}(t)}$ | 0,0 %         | 0,0 %         | 0,0 %         | 0,0 %         | 0,0 %         |
| $F_{INRC_{c1}(t)}$ | 0,0 %         | 0,0 %         | 0,0 %         | 0,0 %         | 0,0 %         |

## Cenário 2: Transição regulatória

$F_{MEPS_{C2}}(t)$ : O fator referente às normas de desempenho energético (MEPS) inicia em 0,1 %, indicando uma regulamentação incipiente, compatível com a hipótese de efetividade moderada: "motores IR3 com abrangência parcial e fiscalização em expansão". O cenário reforça essa leitura ao mencionar a "expansão da fiscalização e dos incentivos", sinalizando um movimento de transição regulatória.

$F_{PREC_{C2}}(t)$ : O fator do preço da energia elétrica é de 2,0 %, valor que permanece constante nos primeiros anos. Este nível moderado está alinhado com a hipótese de "PREC moderado", que começa a estimular o interesse empresarial em eficiência, conforme descrito no texto.

$F_{CUST_{C2}}(t)$ : O fator de custo comparativo entre motores novos e reconicionados é de 10,0 %, indicando uma redução significativa no custo dos motores eficientes. Isso se aproxima da hipótese de alta efetividade: "custo baixo para motores eficientes", sugerindo que políticas de incentivo ou avanços tecnológicos estão tornando os motores novos mais acessíveis, como indicado pela "realização de substituições graduais" pelas empresas.

$F_{INRC_{C2}}(t)$  e  $F_{CPRC_{C2}}(t)$ : Ambos os fatores iniciam em 0,1 %, refletindo uma adoção inicial de tecnologias inovadoras nos serviços de condicionamento (INRC) e uma conscientização incipiente por parte das empresas (CPRC). Esses valores são compatíveis com a hipótese de efetividade moderada: "adoção seletiva com equipamentos básicos e certificação mínima" e "conhecimento limitado sobre impactos reais". O cenário reforça essa interpretação, com base no pressuposto que "a inovação impacta na introdução de novas práticas e tecnologias, embora a difusão ainda seja desigual".

$F_{REBE_{C2}}(t)$ : O fator do efeito rebote acumulado é de 13 %, indicando um impacto ainda pequeno, mas maior que no Cenário 1. Isso sugere que os ganhos de eficiência começam a se traduzir em aumento de produção ou uso intensivo, conforme a hipótese de "efeito rebote moderado (5–15 %)".

O cenário 2 representa um ambiente de transição institucional, onde políticas públicas começam a se consolidar, mas ainda enfrentam limitações estruturais. A presença de valores positivos em todos os fatores indica avanços graduais, especialmente na redução de custos (CUST) e na regulamentação energética

(MEPS).

Os valores atribuídos aos fatores refletem um cenário de transição regulatória, onde políticas públicas começam a ganhar efetividade, mas ainda não atingem maturidade. A redução do custo dos motores eficientes (10,0 %) pode ser atribuída a incentivos fiscais, aumento da escala de produção ou avanços tecnológicos.

A estabilidade do preço da energia elétrica (2,0 %) contribui para uma pressão moderada por eficiência, enquanto os baixos valores de MEPS (0,1 %) indicam que a regulamentação ainda está em fase de implementação. A adoção tecnológica e a conscientização empresarial (0,1 %) refletem a necessidade de campanhas educativas, certificações e dados confiáveis sobre desempenho.

O efeito rebote (0,5 %) é justificado pela melhoria gradual na eficiência dos motores, que começa a impactar a produtividade industrial, embora de forma limitada. O texto destaca que a mitigação do efeito rebote depende de políticas de monitoramento, incentivo à inovação e educação dos gestores industriais.

Tabela 4.4 – Fatores das variáveis do modelo no cenário 2: Transição regulatória

| (t)               | [2025 – 2029[ | [2030 – 2034[ | [2035 – 2039[ | [2040 – 2044[ | [2045 – 2050] |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $F\_CUST_{c1}(t)$ | 10,0 %        | 10,0 %        | 10,0 %        | 10,0 %        | 10,0 %        |
| $F\_PREC_{c1}(t)$ | 2,0 %         | 2,0 %         | 2,0 %         | 2,0 %         | 2,0 %         |
| $F\_MEPS_{c1}(t)$ | 0,1 %         | 1,0 %         | 1,0 %         | 2,0 %         | 2,0 %         |
| $F\_REBE_{c1}(t)$ | 0,5 %         | 0,5 %         | 0,5 %         | 0,5 %         | 0,5 %         |
| $F\_CPRC_{c1}(t)$ | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,2 %         | 0,2 %         |
| $F\_INRC_{c1}(t)$ | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         |

### Cenário 3: Regulamentação rigorosa com paradoxo

$F\_MEPS_{c3}(t)$ : O fator associado às normas mínimas de desempenho energético (MEPS) apresenta um valor inicial de apenas 0,1 %, o que pode indicar uma fase preliminar de implementação ou uma baixa representatividade nos indicadores de desempenho analisados. A partir de 2030, observa-se um avanço significativo com a introdução dos motores IR4, elevando esse fator para 3,0 %. Em 2040, há novo incremento, atingindo 4,0 %, o que sugere um processo de difusão tecnológica mais consolidado. Esses dados indicam que, embora as regulamentações apresentem elevado rigor técnico, sua efetividade prática ainda está em desenvolvimento, com impactos mais expressivos previstos para médio e longo prazo.

$F\_PREC_{C3}(t)$ : O fator do preço da energia elétrica é de 3,0 %, valor moderado que torna economicamente vantajosa a modernização, conforme descrito no cenário. Este nível é compatível com a hipótese de alta efetividade, onde o PREC é "alto", gerando estímulo à eficiência.

$F\_CUST_{C3}(t)$ : O fator de custo comparativo entre motores novos e reconicionados é de 15,0 %, indicando uma redução significativa no custo dos motores eficientes. Isso está alinhado com a hipótese de alta efetividade: "custo baixo dos motores novos eficientes", favorecendo a substituição tecnológica.

$F\_INRC_{C3}(t)$  e  $F\_CPRC_{C3}(t)$ : Ambos os fatores apresentam valores iniciais de 0,1%, refletindo uma fase embrionária tanto na adoção de tecnologias inovadoras aplicadas aos serviços de recondicionamento (INRC), quanto na conscientização empresarial acerca da relevância desses processos (CPRC). Em 2040, observa-se um incremento para 0,2%, indicando um avanço gradual na difusão tecnológica e na maturação do conhecimento técnico. Esse crescimento sugere uma transição do entendimento parcial sobre os impactos negativos associados ao uso de motores reconicionados de baixa qualidade para uma compreensão mais aprofundada, sustentada por dados técnicos e de desempenho.

$F\_REBE_{C3}(t)$ : O fator do efeito rebote acumulado é de 26 %, valor relativamente alto em comparação aos cenários anteriores. O cenário confirma essa tendência ao afirmar que o efeito rebote é "alto (15–30 %)", indicando que os ganhos de eficiência estão sendo convertidos em aumento de produção e consumo agregado.

O cenário 3 representa um ambiente de alta complexidade regulatória e tecnológica, onde os avanços em eficiência energética são significativos, mas os impactos ambientais são mitigados por efeitos indiretos.

Os valores atribuídos aos fatores refletem um cenário paradoxal, onde a alta efetividade regulatória e tecnológica não se traduz automaticamente em benefícios ambientais. O custo reduzido dos motores eficientes (15,0 %) e o preço moderado da energia (3,0 %) incentivam a modernização, mas também estimulam o consumo.

A baixa representação dos fatores de inovação e conscientização (0,1 – 0,2 %) pode ser explicada por limitações metodológicas ou pela defasagem entre implementação e mensuração dos impactos. O efeito rebote elevado (26,0 %) é justificado pela expansão industrial e pelo uso massivo de tecnologias eficientes, conforme descrito no texto.

A ausência de instrumentos econômicos e regulatórios específicos para mitigar o efeito rebote é apontada como uma lacuna crítica. Recomenda-se a adoção de políticas complementares, como programas de reinvestimento dos ganhos de eficiência em energia limpa e tecnologias de baixo carbono.

Tabela 4.5 – Fatores das variáveis do modelo no cenário 3: Regulamentação rigorosa com paradoxo

| (t)                | [2025 – 2029[ | [2030 – 2034[ | [2035 – 2039[ | [2040 – 2044[ | [2045 – 2050] |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $F_{CUST_{C1}}(t)$ | 15,0 %        | 15,0 %        | 15,0 %        | 20,0 %        | 20,0 %        |
| $F_{PREC_{C1}}(t)$ | 3,0 %         | 3,0 %         | 3,0 %         | 3,0 %         | 3,0 %         |
| $F_{MEPS_{C1}}(t)$ | 0,1 %         | 3,0 %         | 3,0 %         | 4,0 %         | 4,0 %         |
| $F_{REBE_{C1}}(t)$ | 1,0 %         | 1,0 %         | 1,0 %         | 1,0 %         | 1,0 %         |
| $F_{CPRC_{C1}}(t)$ | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,2 %         | 0,2 %         |
| $F_{INRC_{C1}}(t)$ | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         | 0,1 %         |

#### Cenário 4: Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável

$F_{MEPS_{C4}}(t)$ : O fator relacionado às normas mínimas de desempenho energético (MEPS) apresenta um valor inicial de 0,1 %, o que pode ser considerado modesto diante do cenário descrito, que enfatiza o "rigor normativo" e a adoção de padrões elevados. No entanto, observa-se uma transição significativa a partir de 2030, com um aumento expressivo para 3,0 %, seguido por novo crescimento em 2040, atingindo 4,0 %. Esse avanço representa um impacto substancial nos níveis de eficiência dos motores novos, sinalizando uma melhoria consistente em direção às metas previstas pelo cenário. Tal evolução evidencia não apenas a efetividade crescente das regulamentações, mas também o fortalecimento da capacidade tecnológica do setor em atender aos padrões exigidos.

$F_{PREC_{C4}}(t)$ : O fator do preço da energia elétrica é de 5,0 %, valor considerado baixo, o que está em consonância com o cenário que afirma "preço baixo de energia", tornando a modernização economicamente vantajosa.

$F_{CUST_{C4}}(t)$ : O fator de custo comparativo entre motores novos e reconicionados é de 25,0 %, chegando à 40,0 % em 2040 devido a difusão tecnológica, indicando uma significativa redução no custo dos motores eficientes. Isso está alinhado com a hipótese de alta efetividade: "custo baixo entre novos eficientes", favorecendo a substituição tecnológica e a adoção de práticas sustentáveis.

$F_{INRC_{C4}}(t)$  e  $F_{CPRC_{C4}}(t)$ : Ambos os fatores iniciam em 0,2 %, refletindo uma adoção inicial de tecnologias inovadoras nos serviços de condicionamento (INRC) e uma conscientização crescente por parte das empresas (CPRC). Esses valores são compatíveis com a hipótese de efetividade moderada, mas o cenário sugere que há uma evolução contínua, com "processos inovadores de condicionamento" e "instrumentos econômicos articulados", o que pode ser visto com o aumento para 0,4 % e 0,3 % em 2040.

$F_{REBE_{C4}}(t)$ : O fator do efeito rebote é de 13 %, valor moderado que está em consonância com o cenário, que afirma que o efeito rebote é "mantido em patamares moderados (5–15 %)" graças a políticas complementares de mitigação.

O cenário 4 representa um ambiente de máxima convergência institucional e tecnológica, onde políticas públicas, normas técnicas, inovação e instrumentos econômicos atuam de forma articulada.

Os valores atribuídos aos fatores refletem um cenário de equilíbrio sustentável, no qual os avanços tecnológicos e regulatórios são acompanhados por instrumentos econômicos e políticas complementares. O custo reduzido dos motores eficientes (25,0 %) e o preço baixo da energia (5,0 %) incentivam a modernização, enquanto a regulamentação técnica (MEPS) começa a se consolidar.

A difusão tecnológica e a conscientização empresarial (0,2 – 0,4 %) indicam uma evolução gradual, compatível com o estágio inicial de implementação de políticas integradas. O efeito rebote moderado é justificado pela presença de mecanismos de controle, como precificação de carbono e incentivos à circularidade.

Tabela 4.6 – Fatores das variáveis do modelo no cenário 4: Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável

| (t)                | [2025 – 2029[ | [2030 – 2034[ | [2035 – 2039[ | [2040 – 2044[ | [2045 – 2050] |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $F_{CUST_{C1}}(t)$ | 25,0 %        | 25,0 %        | 25,0 %        | 40,0 %        | 40,0 %        |
| $F_{PREC_{C1}}(t)$ | 5,0 %         | 5,0 %         | 5,0 %         | 5,0 %         | 5,0 %         |
| $F_{MEPS_{C1}}(t)$ | 0,1 %         | 3,0 %         | 3,0 %         | 4,0 %         | 4,0 %         |
| $F_{REBE_{C1}}(t)$ | 0,5 %         | 0,5 %         | 0,5 %         | 0,5 %         | 0,5 %         |
| $F_{CPRC_{C1}}(t)$ | 0,2 %         | 0,2 %         | 0,2 %         | 0,4 %         | 0,4 %         |
| $F_{INRC_{C1}}(t)$ | 0,2 %         | 0,2 %         | 0,2 %         | 0,3 %         | 0,3 %         |

#### 4.2.4.

#### Participação de mercado dos motores elétricos industriais

Apresentam-se e discutem-se os resultados da simulação gráfica da

participação de mercado dos motores elétricos industriais no Brasil, utilizando-se as projeções anuais dos diferentes tipos de motores em todos os quatro cenários, com destaque para a Figura 4.13.

Integram-se à discussão as razões técnicas e regulatórias (difusão tecnológica, custos, políticas públicas) por trás do avanço ou persistência de cada categoria ao longo do tempo. Relaciona-se a dinâmica desses resultados com os mecanismos de retroalimentação destacados nos diagramas CLD.

Os resultados demonstrados na Figura 4.13 ilustram a evolução da participação do mercado de motores elétricos industriais em quatro cenários prospectivos distintos ( $MERC_{C1}(t)$ ,  $MERC_{C2}(t)$ ,  $MERC_{C3}(t)$ ,  $MERC_{C4}(t)$ ) abrangendo os anos de 2025 a 2050. Os dados estão segmentados em três categorias de motores: novos ( $MN_{Cn}(t)$ ) (representados em azul), importados de baixa qualidade ( $MI_{Cn}(t)$ ) (laranja) e reconicionados ( $MR_{Cn}(t)$ ) (cinza).

Nos Cenários 1 e 2, observa-se uma estabilidade na distribuição do mercado de motores ao longo do período analisado. No Cenário 1, os motores novos mantêm uma participação de 51 %, enquanto os motores importados de baixa qualidade e os reconicionados representam, respectivamente, 12 % e 37 %. O Cenário 2 apresenta uma leve variação, com os motores novos alcançando 56 %, os importados 11 % e os reconicionados 33 %. Esses cenários refletem uma dinâmica de mercado conservadora, com baixa penetração de inovações tecnológicas e manutenção das preferências atuais dos consumidores industriais.

O Cenário 3 apresenta uma leve tendência de mudança, com os motores reconicionados reduzindo sua participação para cerca de 29 %, enquanto os motores novos aumentam gradualmente sua presença no mercado. Essa variação pode ser interpretada como uma resposta inicial à introdução de tecnologias mais eficientes, embora ainda limitada em termos de impacto estrutural.

No entanto, é no Cenário 4 que se observa uma transformação significativa na composição do mercado. A partir de 2040, há uma alteração na curva de participação dos motores novos, que passam a dominar progressivamente o mercado, atingindo 72 % em 2050. Essa mudança é atribuída à difusão tecnológica, fenômeno que descreve a disseminação e adoção de inovações ao longo do tempo. A incorporação de tecnologias mais avançadas nos motores novos — como maior eficiência energética, menor custo de operação e maior confiabilidade — torna esses modelos substancialmente mais atrativos do ponto de vista técnico e

econômico. Consequentemente, há uma redução expressiva na demanda por motores reconicionados e importados de baixa qualidade.

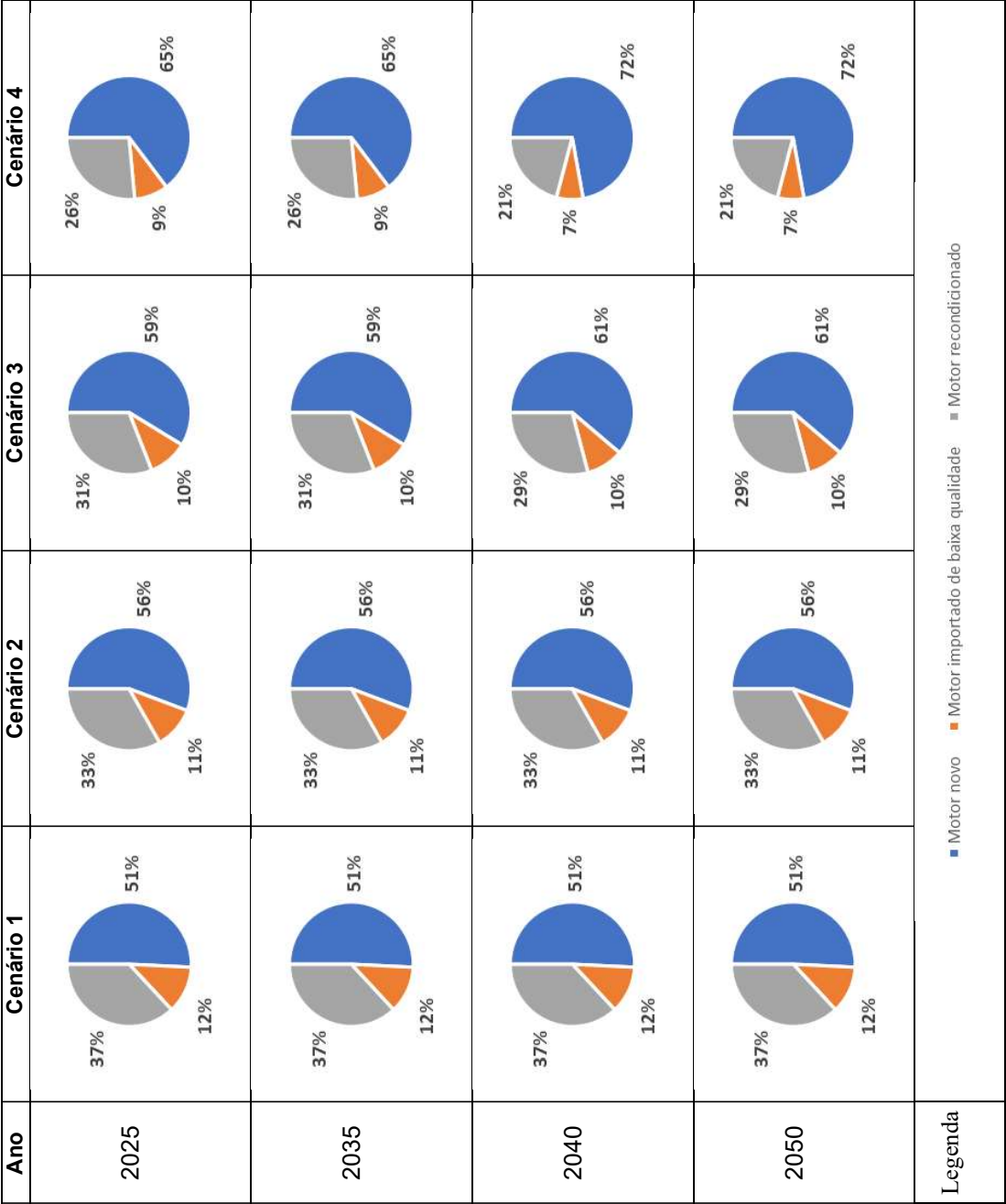


Figura 4.13 – Participação de mercado dos motores elétricos industriais em cada cenário prospectivo

Os gráficos apresentados nas Figura 4.14 à 4.16, fornecem uma visão abrangente sobre o comportamento dos motores elétricos industriais importados de baixa qualidade em diferentes cenários prospectivos, considerando os períodos entre 2025 e 2050. A análise contempla três dimensões principais:

- $EC_{MI_{cn}}(t)$ : Energia consumida dos motores importados (em MWh);
- $CM_{MI_{cn}}$ : Consumo médio do motor importado (em MW/motor); e
- $MI_{cn}(t)$ : Participação de mercado dos motores importados (em número de motores).

Todos os dados são apresentados em relação a linha de base (100 %), e os demais valores variando percentualmente em relação a ela.

No gráfico da Figura 4.14, observa-se que o consumo de eletricidade nos cenários 1, 2 e 3 apresenta uma tendência de crescimento gradual ao longo do tempo, refletindo uma continuidade no uso desses motores. Em contraste, o cenário 4 revela uma trajetória distinta: o consumo permanece estável até aproximadamente 2040, quando ocorre uma queda abrupta, seguida por uma estabilização em patamares inferiores. Essa transição sugere uma mudança estrutural no perfil de consumo energético associada a esses equipamentos.

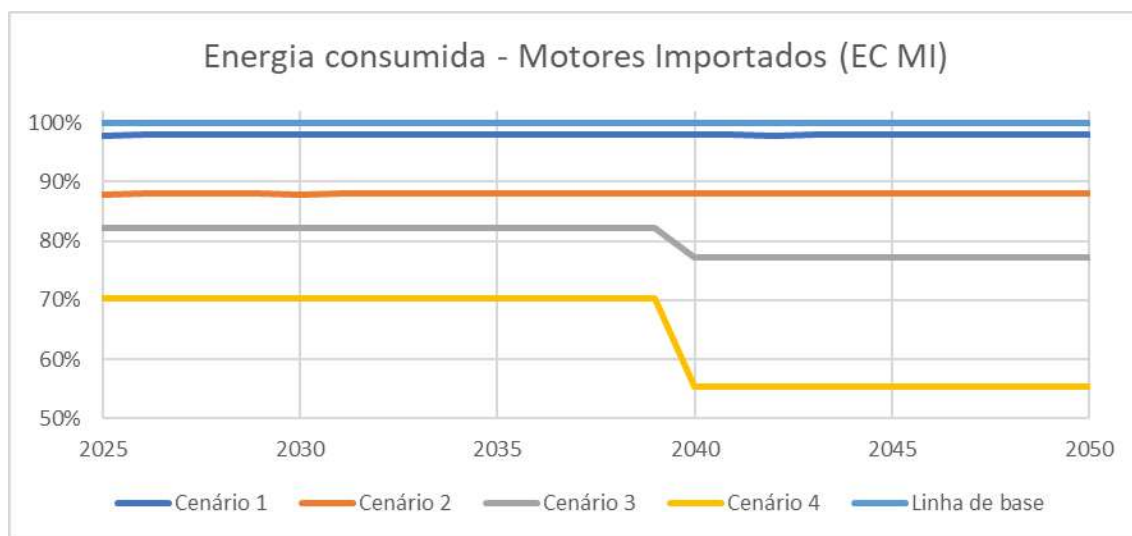


Figura 4.14 – Energia consumida dos motores importados de baixa qualidade

O gráfico da Figura 4.15, que representa o consumo médio, indica estabilidade em todos os cenários, com valores de 6,65 MW/motor, o mesmo da linha de base. Essa constância sugere que a eficiência energética dos motores importados de baixa qualidade não sofre alterações significativas ao longo do período, reforçando a hipótese de que as mudanças observadas nos demais indicadores não decorrem de melhorias intrínsecas

nesses equipamentos.

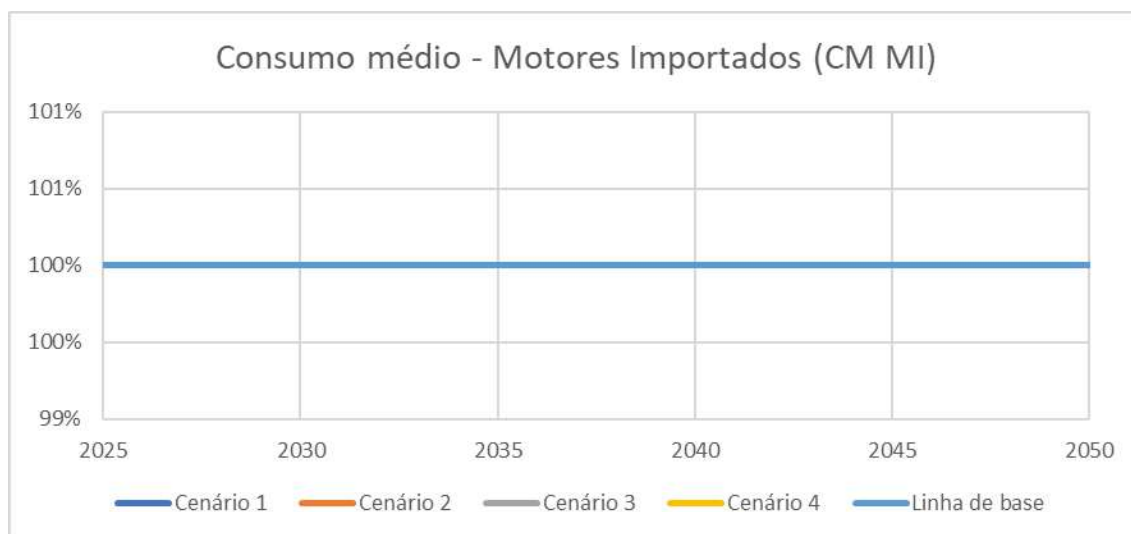


Figura 4.15 – Consumo médio dos motores importados de baixa qualidade

A estabilidade observada sugere que, sob condições conservadoras, não se espera variação significativa na eficiência energética dos motores importados de baixa qualidade ao longo do período analisado. Essa constância pode ser interpretada como reflexo de uma suposição metodológica que considera a ausência de avanços tecnológicos ou mudanças regulatórias que impactem diretamente o desempenho desses equipamentos.

Do ponto de vista analítico, esse resultado é relevante por dois motivos. Primeiro, ele estabelece um parâmetro de comparação para cenários alternativos que incorporam elementos de inovação tecnológica, substituição de equipamentos ou políticas de incentivo à eficiência energética. Segundo, ele evidencia a limitação dos motores importados de baixa qualidade em acompanhar as exigências crescentes do setor industrial, especialmente em contextos de transição energética e modernização produtiva.

A ausência de variação no fator de consumo médio pode indicar que esses motores não são objeto de investimentos significativos em pesquisa e desenvolvimento, permanecendo tecnologicamente estagnados. Tal característica reforça a hipótese de que, em cenários mais dinâmicos — como os representados por avanços tecnológicos a partir de 2040 — esses motores tendem a ser substituídos por alternativas mais eficientes, como motores novos ou reconicionados com melhor desempenho energético.

O gráfico da Figura 4.16, referente à participação de mercado, apresenta uma dinâmica semelhante à do consumo de eletricidade. Nos cenários 1, 2 e 3, há um crescimento contínuo no número de motor, enquanto no cenário 4 verifica-se uma queda acentuada por volta de 2040, seguida por estabilização. Essa redução abrupta na

participação de mercado é indicativa de uma substituição tecnológica em larga escala.

A partir de 2040, as alterações observadas nos gráficos do cenário 3 e 4 podem ser atribuídas à difusão tecnológica.

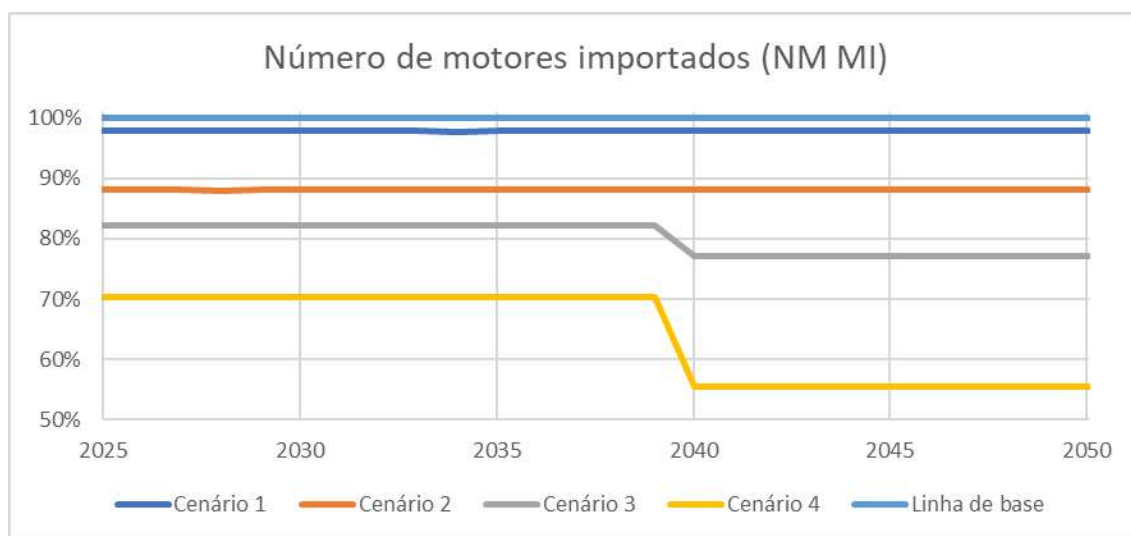


Figura 4.16 – Número de motores importados de baixa qualidade

As Figuras 4.17 a 4.19, apresentam a evolução temporal de três indicadores fundamentais relacionados aos motores elétricos industriais novos:

- $EC_{MN_{cn}}(t)$ : Energia consumida do motor novo (em MWh);
- $CM_{MN_{cn}}$ : Consumo médio do motor novo (em MW/motor); e
- $MN_{cn}(t)$ : Participação de mercado dos motores novo (em número de motores).

Todos os dados são apresentados em relação a linha de base (100 %), e os demais valores variando percentualmente em relação a ela.

O gráfico da Figura 4.17 revela um crescimento gradual no consumo de eletricidade por motores novos em todos os cenários até aproximadamente o ano de 2040. A partir desse ponto, observa-se uma transição nas curvas dos cenários 3 e 4, com um aumento mais acentuado no consumo. Essa mudança sugere uma intensificação da adoção desses motores, possivelmente impulsionada por transformações tecnológicas que os tornam mais atrativos para o setor industrial.

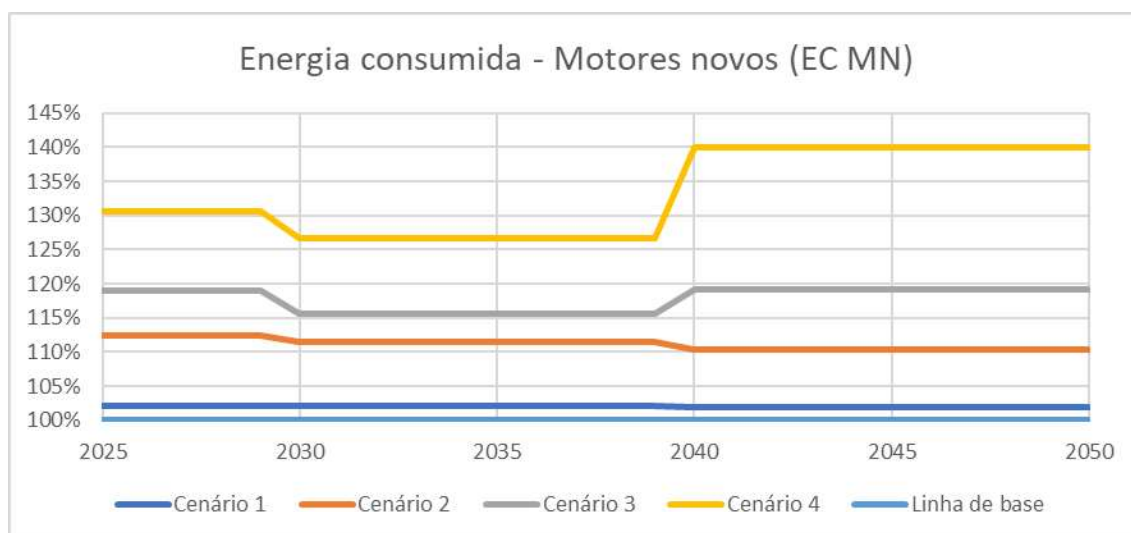


Figura 4.17 – Energia consumida dos motores novos

O gráfico da Figura 4.18, referente ao consumo médio, indica uma queda significativa por volta de 2030, seguida por um período de estabilização até cerca de 2040. Após esse marco temporal, verifica-se uma nova redução no fator de consumo em alguns cenários, especialmente nos cenários 3 e 4. Essa tendência aponta para ganhos de eficiência energética nos motores novos, refletindo avanços tecnológicos incorporados aos equipamentos. Essa dinâmica sugere a incorporação progressiva de melhorias tecnológicas nos motores novos, refletindo ganhos de eficiência energética e avanços na engenharia de projeto e fabricação.

A redução do fator de consumo médio observada nos cenários mais dinâmicos (Cenários 3 e 4) evidencia que os motores novos passam a incorporar tecnologias de ponta, como materiais de alta performance, sistemas de controle inteligente e integração com redes industriais digitais. Tais avanços não apenas reduzem o consumo energético por unidade, como também aumentam a confiabilidade e a vida útil dos equipamentos.

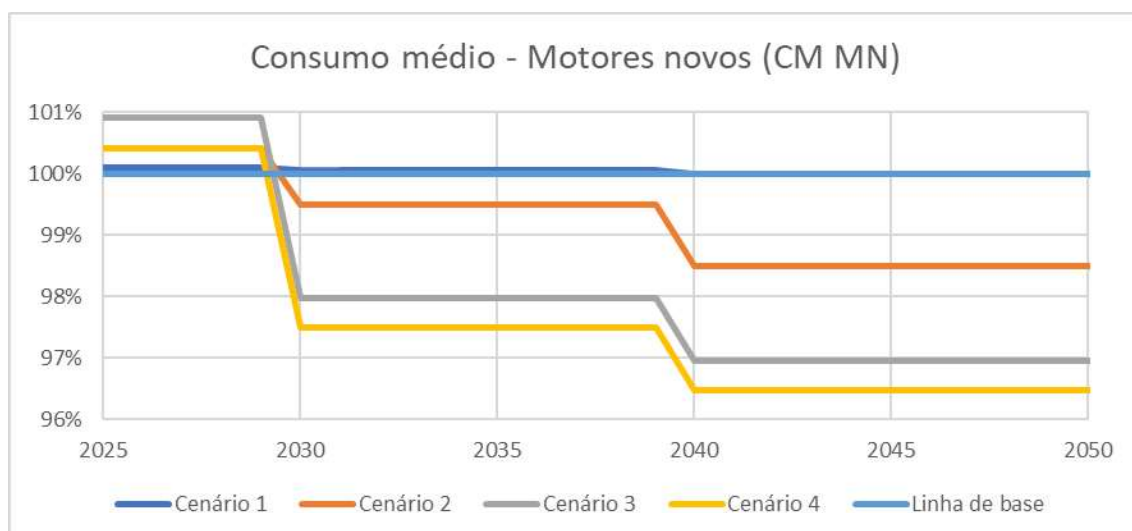


Figura 4.18 – Consumo médio dos motores novos

O gráfico da Figura 4.19, que representa a participação de mercado dos motores novos, mostra um crescimento contínuo até 2040, seguido por uma aceleração mais pronunciada nos cenários 3 e 4. Esse comportamento é indicativo de uma substituição tecnológica em larga escala, com os motores novos assumindo uma posição dominante no mercado.

A partir de 2040, as alterações observadas nos três gráficos podem ser atribuídas à difusão tecnológica. A incorporação de tecnologias mais eficientes, confiáveis e sustentáveis nos motores novos promove sua ampla aceitação no mercado, em detrimento de modelos menos avançados. Esse fenômeno é impulsionado por fatores como políticas públicas de incentivo à inovação, exigências regulatórias voltadas à eficiência energética e à sustentabilidade, além da crescente demanda por soluções industriais mais modernas e econômicas.

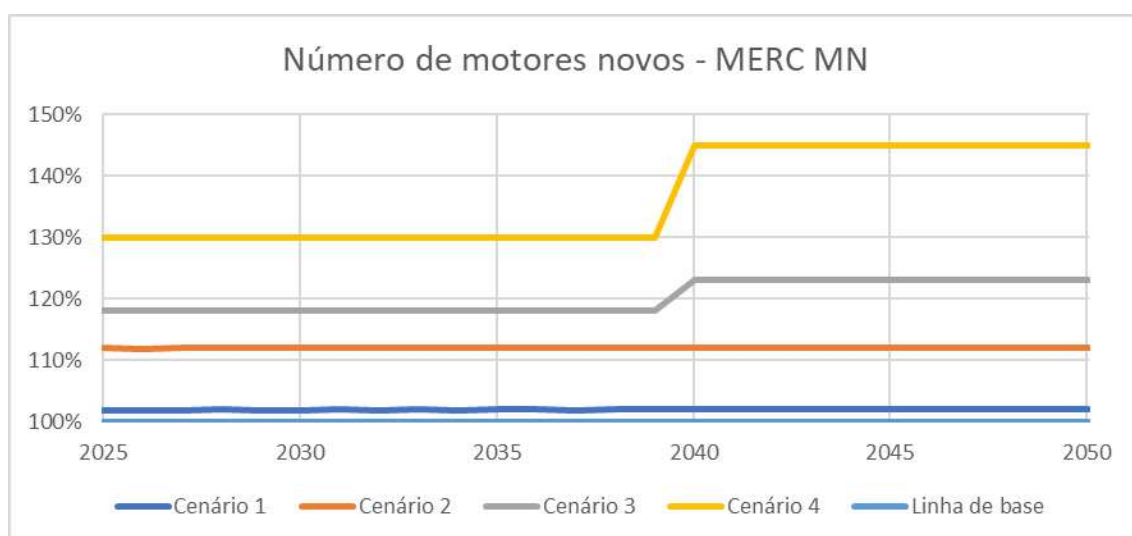


Figura 4.19 – Número de motores novos

As Figuras 4.20 a 4.22, apresentam a evolução de três indicadores-chave relacionados aos motores elétricos industriais em operação no período de 2025 a 2050, considerando quatro cenários prospectivos. Os gráficos analisam:

- $EC_{MO_{Cn}}(t)$ : Energia consumida do motor em operação (em MWh);
- $CM_{MO_{Cn}}$ : Consumo médio do motor em operação (em MW/motor); e
- $MO_{Cn}(t)$ : Participação de mercado dos motores em operação (em número de motores).

Todos os dados são apresentados em relação a linha de base (100 %), e os demais valores variando percentualmente em relação a ela.

No gráfico da Figura 4.20, observa-se um crescimento linear do consumo energético em todos os cenários até o ano de 2040. A partir desse ponto, os Cenários 3 e 4 apresentam uma aceleração mais pronunciada, indicando uma intensificação da atividade dos motores em operação. Essa transição sugere uma mudança estrutural no perfil de consumo, possivelmente associada à substituição de tecnologias obsoletas por modelos mais eficientes.

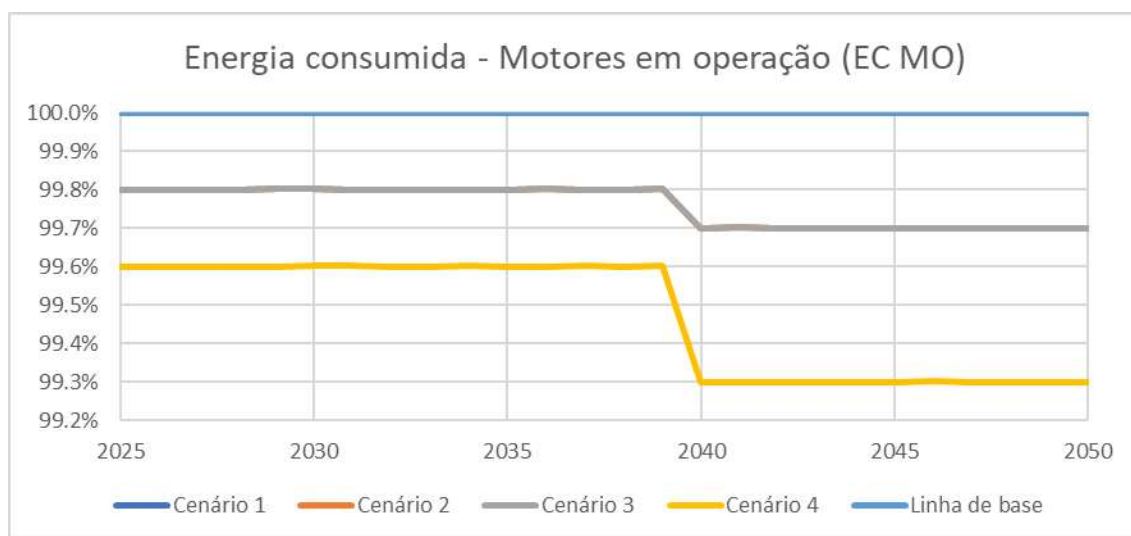


Figura 4.20 – Energia consumida dos motores em operação

O gráfico da Figura 4.21, revela uma redução significativa no consumo médio por motor a partir de 2040, especialmente nos Cenários 3 e 4. Essa queda é indicativa de ganhos substanciais em eficiência energética, refletindo a incorporação de tecnologias avançadas nos motores em operação. A diminuição do fator de consumo médio, sem prejuízo ao crescimento do consumo total, reforça a hipótese de modernização tecnológica do parque industrial.

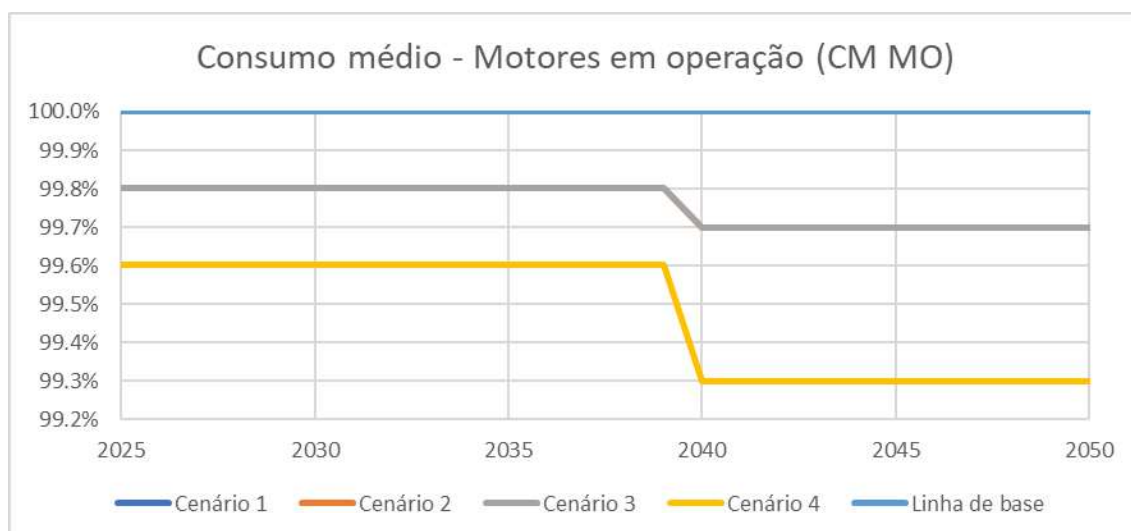


Figura 4.21 – Consumo médio dos motores em operação

O gráfico da Figura 4.22, mostra um crescimento contínuo da presença dos motores. A introdução de motores com maior desempenho energético, menor custo operacional e maior confiabilidade técnica promove uma reconfiguração do mercado, substituindo gradualmente os modelos menos eficientes. Esse processo é impulsionado por políticas públicas voltadas à sustentabilidade, exigências regulatórias mais rigorosas e pela crescente demanda por soluções industriais que conciliem produtividade e responsabilidade ambiental.

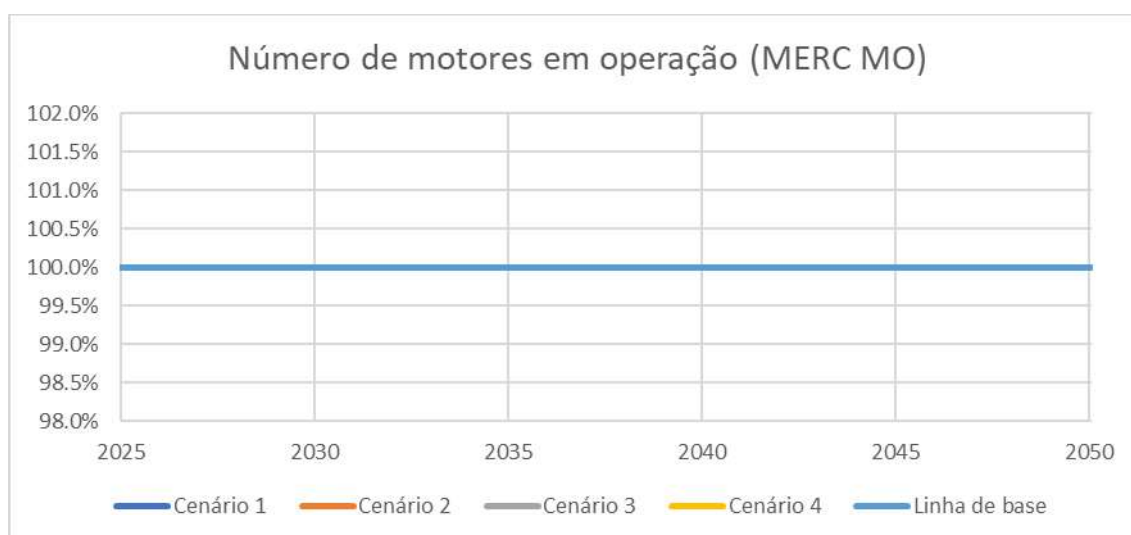


Figura 4.22 – Número de motores em operação

As Figuras 4.23 a 4.25 apresentam a evolução temporal de três indicadores fundamentais relacionados aos motores elétricos industriais reconicionados, considerando quatro cenários prospectivos entre os anos de 2025 e 2050. Os gráficos analisam:

- $EC_{MR_{cn}}(t)$ : Energia consumida dos motores reconicionados (em MWh);
- $CM_{MR_{cn}}$ : Consumo médio do motor reconicionado (em MW/motor); e
- $MR_{cn}(t)$ : Participação de mercado dos motores reconicionados (em número de motores).

Todos os dados são apresentados em relação a linha de base (100 %), e os demais valores variando percentualmente em relação a ela.

O gráfico da Figura 4.23, revela um crescimento gradual no consumo energético até aproximadamente o ano de 2040 em todos os cenários prospectivos (cenários 1 a 4). A partir desse ponto, observa-se uma queda significativa no consumo nos cenários 3 e 4, sugerindo uma redução na utilização desses motores no parque industrial.

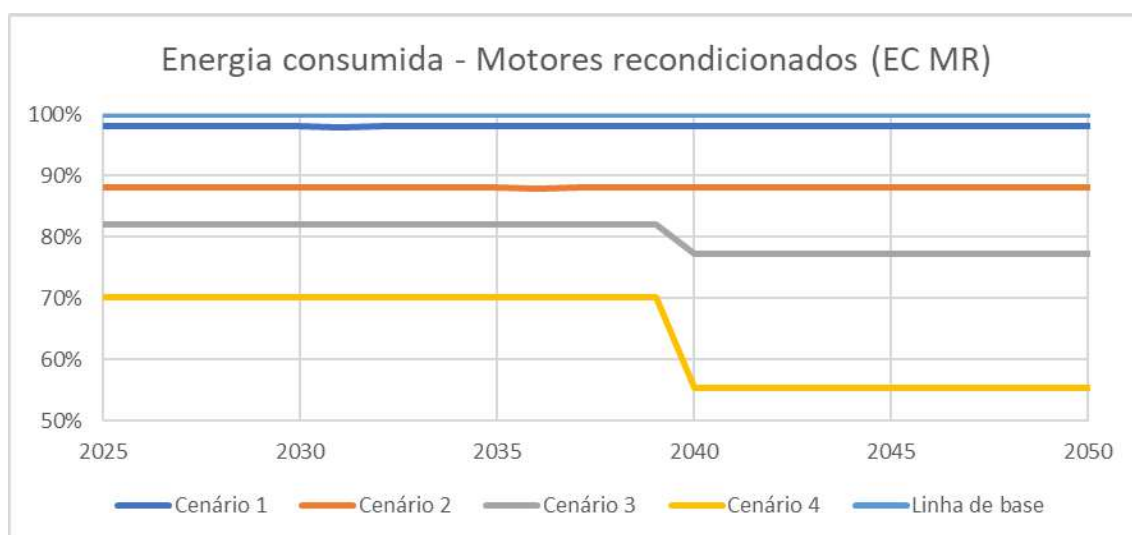


Figura 4.23 – Energia consumida dos motores reconicionados

O gráfico da Figura 4.24, apresenta uma trajetória estável para todos os cenários até cerca de 2040, quando ocorre uma redução abrupta nos fatores de consumo apenas no cenário 4. Essa queda indica uma possível substituição dos motores reconicionados por modelos mais eficientes, ou uma diminuição na sua relevância operacional, refletindo mudanças estruturais na composição tecnológica do setor.

No cenário 4, observa-se uma estabilidade no fator de consumo médio entre os anos de 2025 e 2039, com valor de 99,8 % (6,805 MWh/motor). A partir de 2039, há uma transição na curva, com redução para 99,7 % (6,798 MWh/motor), valor que se mantém

constante até o final do período analisado, em 2050. Essa variação, embora modesta em magnitude, é significativa do ponto de vista técnico, pois indica uma melhoria na eficiência energética dos motores reconicionados.

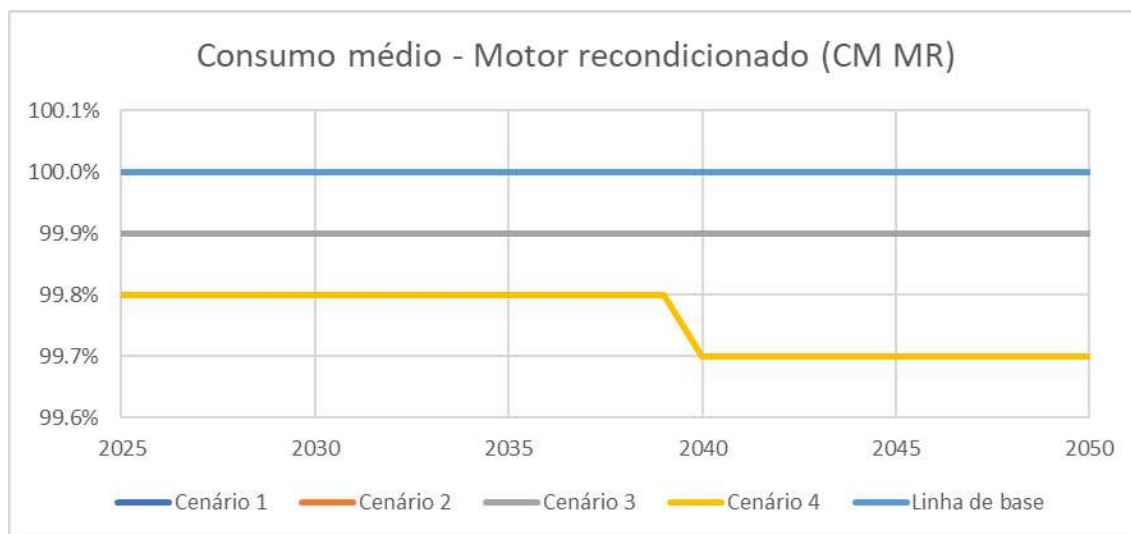


Figura 4.24 – Consumo médio dos motores reconicionados

O gráfico da Figura 4.25, mostra um crescimento constante para os cenários 1 e 2, e para os cenários 3 e 4 até 2040, quando acontece uma queda acentuada. Essa retração na participação de mercado é compatível com os padrões observados nos demais gráficos, reforçando a hipótese de uma transição tecnológica.

No contexto do cenário 4, que representa uma projeção mais otimista em termos de inovação e políticas de incentivo à eficiência energética, a queda no consumo médio por motor sugere que os motores reconicionados passam a desempenhar papel mais competitivo no mercado, aproximando-se dos padrões de desempenho dos motores novos. Essa tendência é relevante para a formulação de estratégias industriais sustentáveis, pois os motores reconicionados oferecem uma alternativa de menor custo e menor impacto ambiental, desde que operem com níveis adequados de eficiência.

A mudança observada nos três gráficos a partir de 2040 pode ser atribuída à difusão tecnológica. A introdução de motores novos, mais eficientes e com maior confiabilidade operacional, promove a substituição gradual dos motores reconicionados, cuja performance energética e durabilidade são inferiores.

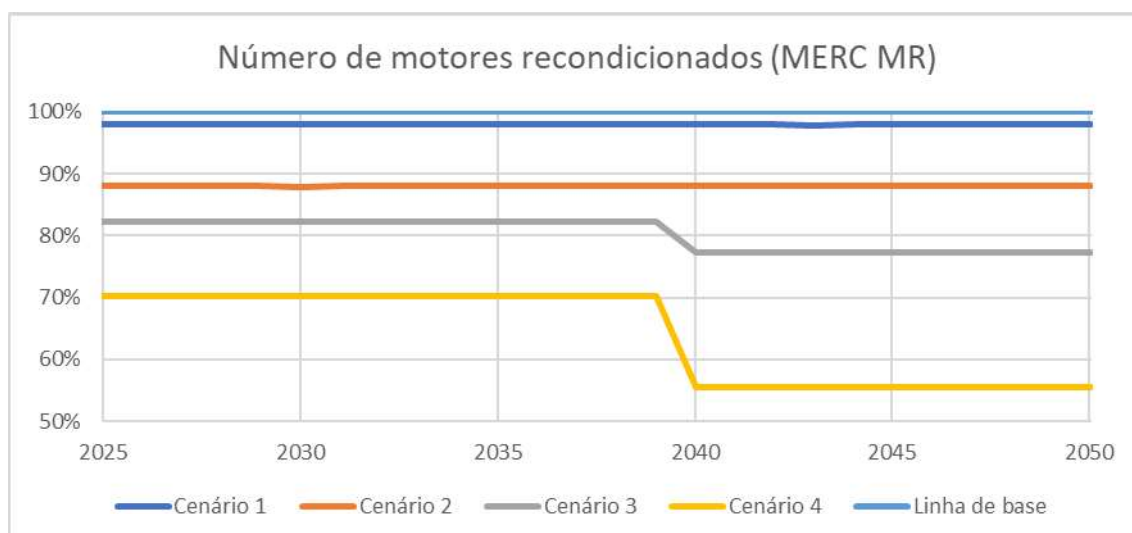


Figura 4.25 – Número de motores reconicionados

#### 4.2.5.

#### Consumo energético dos motores elétricos industriais ( $EC_{cn}(t)$ )

A Figura 4.26 apresenta projeções do consumo de eletricidade ( $EC_{cn}(t)$ ) no mercado de motores industriais ao longo do período de 2025 a 2050, expressas em relação a linha de base (100 %), e os demais valores variando percentualmente em relação a ela.

O gráfico contempla cinco trajetórias distintas: quatro cenários prospectivos (cenários 1 a 4) e uma linha de base, permitindo a comparação entre diferentes condições de evolução tecnológica e de mercado.

Observa-se uma tendência geral de crescimento no consumo de eletricidade em todos os cenários, refletindo a expansão da atividade industrial e o aumento da demanda por motores elétricos. A linha de base (preta) serve como referência para os demais cenários, representando uma projeção conservadora sem alterações significativas nas condições tecnológicas ou regulatórias.

Os cenários 1 (azul) e 2 (vermelho) apresentam variações discretas em relação à linha de base, sugerindo uma continuidade dos padrões atuais de consumo, com pequenas melhorias operacionais ou ajustes de mercado. Já os cenários 3 (verde) e 4 (cinza) indicam uma desaceleração mais pronunciada no consumo a partir da década de 2040, o que pode ser interpretado como resultado da difusão tecnológica no setor.

Essa transição representa uma mudança estrutural no setor, com implicações relevantes para o planejamento energético, políticas industriais e estratégias de sustentabilidade.

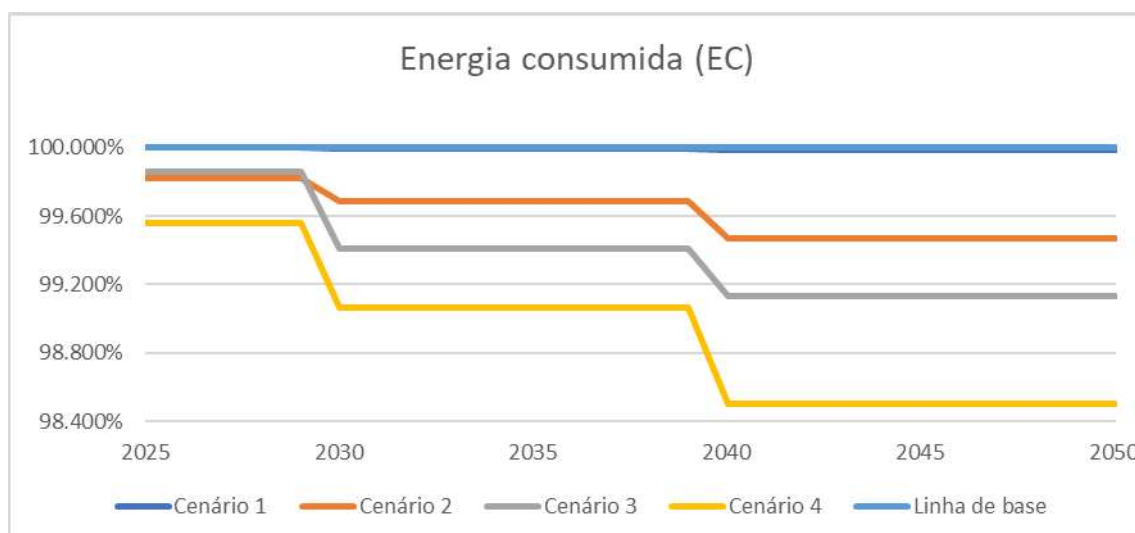


Figura 4.26 – Consumo de eletricidade  $EC_{cn}(t)$  em cada cenário prospectivo

De forma comparativa (Quadro 4.4), os motores novos e os motores em operação (em cenários dinâmicos) são os principais beneficiários da difusão tecnológica a partir de 2040, com ganhos expressivos em eficiência energética. Os motores reconicionados apresentam melhorias modestas, enquanto os motores importados de baixa qualidade permanecem tecnologicamente estagnados, reforçando sua tendência de obsolescência no contexto da transição energética.

Essa dinâmica reforça a importância de políticas industriais voltadas à inovação, à substituição tecnológica e à promoção de práticas sustentáveis no setor de motores elétricos industriais.

Quadro 4.3 – Comparação entre os consumos médios de cada tipo de motor até 2050

| Tipo de motor                | Tendência           | Intensidade da mudança | Interpretação tecnológica                  |
|------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------------------------|
| Novo                         | Queda acentuada     | Alta                   | Difusão tecnológica acelerada              |
| Reconicionado                | Queda leve          | Moderada               | Melhoria incremental via recondicionamento |
| Importado de baixa qualidade | Estável             | Nula                   | Estagnação tecnológica                     |
| Em operação (geral)          | Queda significativa | Alta                   | Substituição tecnológica em larga escala   |

#### 4.2.6.

##### Energia conservada $ENCO_{cn}$

A energia conservada ( $ENCO_{cn}(t)$ ) constitui um dos pilares fundamentais para a transição energética sustentável, especialmente no contexto industrial, no qual o consumo de eletricidade representa parcela significativa dos custos operacionais e dos impactos ambientais. A Figura 4.27 apresenta projeções de conservação de energia, expressas em

relação a linha de base (100 %), e os demais valores variando percentualmente em relação a ela., para quatro cenários prospectivos e uma linha de base, ao longo do período de 2025 a 2050.

O gráfico revela que todos os cenários analisados apresentam trajetórias de redução de energia, indicando ganhos progressivos em eficiência energética. Os valores no eixo vertical representam a quantidade de energia conservada em relação à linha de base, que permanece constante ao longo do tempo. Essa abordagem permite avaliar o impacto das estratégias de conservação em termos absolutos, facilitando a comparação entre os diferentes cenários.

O cenário 4 (linha cinza) destaca-se como o mais eficiente em termos de conservação energética, atingindo 1,5 % por volta do ano de 2040. Essa redução significativa sugere a adoção de tecnologias avançadas, políticas públicas robustas e práticas industriais voltadas à otimização do consumo energético.

O cenário 3 (linha verde) e o cenário 2 (linha vermelha) apresentam reduções intermediárias, indicando que embora haja avanços em conservação de energia, estes são menos intensos que no cenário 4. Esses cenários podem representar contextos em que a inovação tecnológica ocorre de forma mais gradual, ou em que as políticas de incentivo à eficiência energética são menos agressivas. Ainda assim, os ganhos observados são relevantes e contribuem para a mitigação dos impactos ambientais e para a melhoria da competitividade industrial.

Por fim, o cenário 1 (linha azul) apresenta a menor redução energética entre os cenários prospectivos, mantendo-se próximo à linha de base. Este resultado pode ser interpretado como um cenário conservador, no qual não há mudanças significativas nos padrões tecnológicos ou regulatórios. A baixa conservação de energia nesse contexto evidencia os riscos de estagnação tecnológica e reforça a necessidade de políticas públicas que estimulem a inovação e a modernização do parque industrial.

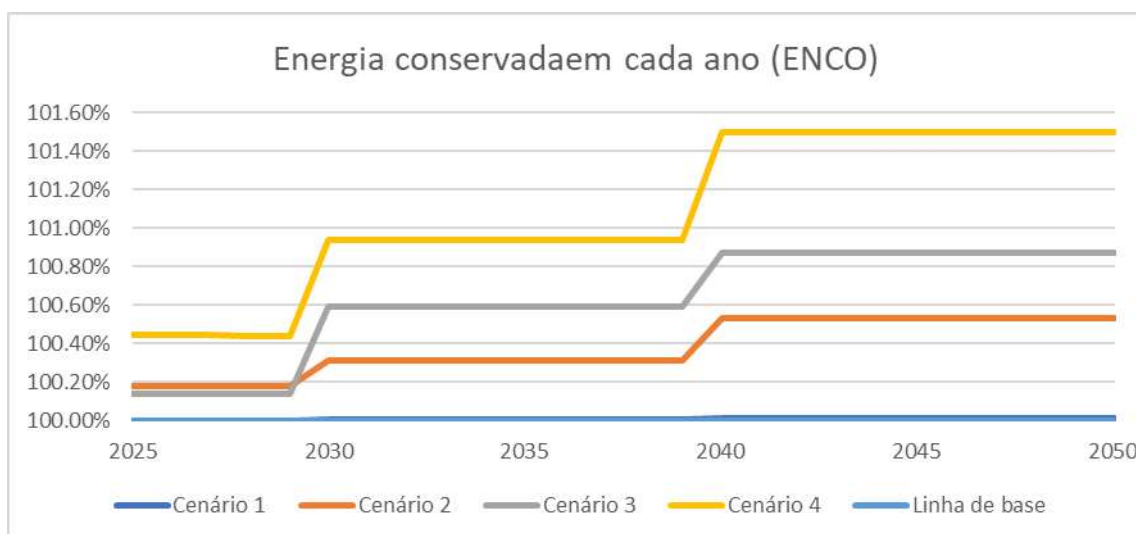


Figura 4.27 – Energia conservada  $ENCO_{cn}(t)$  em cada ano até 2050.

No gráfico 4.28, apresenta a energia conservada acumulada de cada cenário prospectivo até 2050. O cenário 4 (linha cinza) destaca-se como o mais eficiente, tingindo em 2050, aproximadamente 28 % de energia conservada acumulada em relação a linha de base.

O cenário 3 atinge em 2050, aproximadamente 16,1 % de energia conservada acumulada em relação a linha de base, já o cenário 2 apenas 9,8 %.

O cenário 1 apresenta a menor redução energética entre os cenários prospectivos, mantendo-se próximo à linha de base.

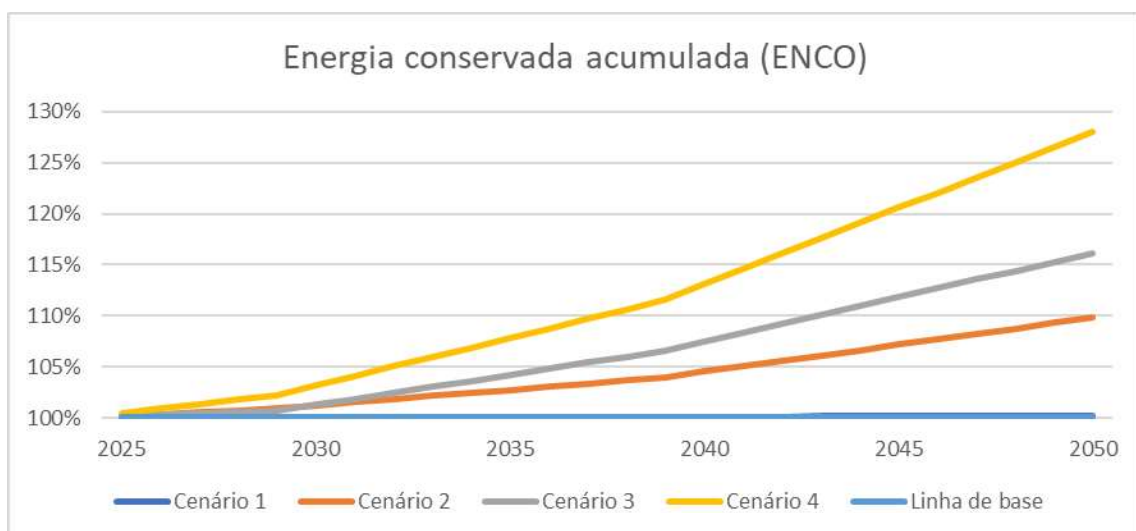


Figura 4.28 – Energia conservada  $ENCO_{cn}(t)$  acumulado até 2050.

#### 4.2.7.

#### **Efeito rebote da eficiência energética de motores elétricos industriais em cada cenário prospectivo**

A partir dos resultados dos dados referentes à energia conservada  $ENCO_{cn}(t)$  e ao consumo energético da linha de base ( $EC_{cn}(t)$ ) e considerando os valores projetados de conservação de energia para cada cenário prospectivo analisado ( $\%ENCO_{cn}$ ), torna-se possível estimar o efeito rebote associado a cada um deles. Essa abordagem permite avaliar em que medida os ganhos de eficiência energética são compensados, parcial ou totalmente, pelo aumento no consumo decorrente de mudanças comportamentais ou operacionais induzidas pela própria difusão tecnológica.

#### **Efeitos rebote no cenário 1: Regulamentação seletiva**

Este cenário é caracterizado por políticas públicas e normas técnicas de baixa efetividade, observa-se uma limitação estrutural na promoção da eficiência energética no setor de motores elétricos industriais. O resultado da simulação realizada no Vensim®, representada na Figura 4.20, evidencia esse contexto ao apresentar um comportamento crescente do efeito rebote ao longo do período de 2025 a 2050, mesmo com uma taxa de energia conservada (ENCO) restrita a apenas 2,5 %.

Inicialmente, o efeito rebote é praticamente inexistente, refletindo as barreiras econômicas e regulatórias descritas no cenário, como o baixo incentivo à inovação (INOV), a limitada fiscalização das normas de desempenho energético (MEPS) e o custo elevado dos motores novos eficientes (CUST). Contudo, a partir de 2030, observa-se um aumento gradual do efeito rebote, que se estabiliza em torno de 0,7 % até 2039, coincidindo com uma leve melhora na adoção de tecnologias e maior conscientização setorial (INRC e CPRC). Após esse período, o efeito rebote volta a crescer, atingindo cerca de 1,3 % e permanecendo nesse patamar até 2050, sugerindo que mesmo avanços tímidos podem gerar impactos indiretos no consumo energético.

Esse comportamento reforça a necessidade de fortalecimento institucional e regulatório, como destacado nas recomendações do cenário. A ausência de políticas integradas e de um marco regulatório robusto limita o potencial de extensão da vida útil dos motores (VIDA) e restringe a modernização do parque industrial, impedindo que ganhos de eficiência se traduzam em transformações significativas no setor.

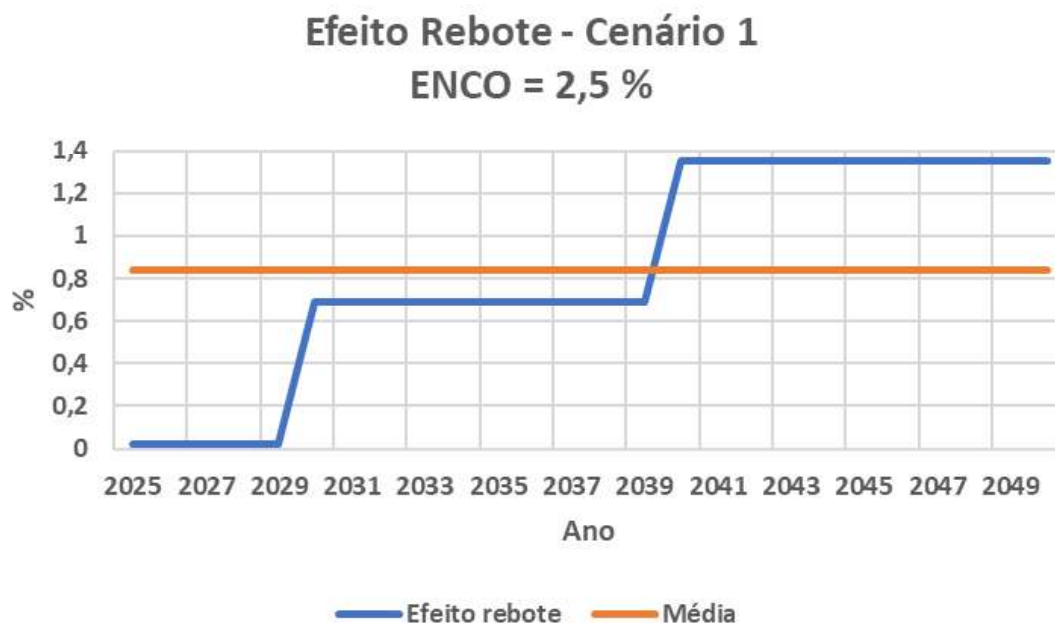


Figura 4.29 – Efeitos rebote no cenário 1, considerando a variável ENCO = 2,5 %

Assim, os resultados da simulação corroboram a hipótese de que, sem mudanças estruturais, os impactos positivos permanecem marginais e o efeito rebote tende a crescer de forma descontrolada, mesmo em contextos de baixa efetividade.

### Efeitos rebote no cenário 2: Transição regulatória

Neste segundo cenário, observa-se uma evolução gradual das políticas públicas voltadas à eficiência energética (PEEE) e das normas técnicas de desempenho (MEPS), com ampliação da fiscalização e dos incentivos. Esse avanço contribui para um ambiente mais favorável à inovação tecnológica (INOV), que começa a se difundir não apenas entre fabricantes de motores novos, mas também em parte dos serviços de recondiçãoamento. O preço da energia elétrica (PREC), embora moderado, passa a estimular o interesse empresarial por práticas mais eficientes.

A Figura 4.21 evidencia um crescimento do efeito rebote (REBE), que parte de cerca de 3 % em 2025, sobe para 4 % em 2031, e atinge 7 % por volta de 2040, mantendo-se nesse patamar até 2050. O efeito rebote médio deste cenário é de 5 %, refletindo um comportamento moderado e estável ao longo do período.

Os dados obtidos a partir da simulação executada no Vensim®, representada na Figura 4.21, para um cenário de energia conservada (ENCO) esperada de 7,5 %.

Esse padrão de crescimento do efeito rebote está alinhado com o contexto descrito no cenário, onde empresas começam a utilizar parte dos ganhos de eficiência para

expandir suas atividades produtivas. Embora esse movimento represente um avanço econômico, ele também impõe desafios à sustentabilidade dos ganhos energéticos. A mitigação do efeito rebote depende da implementação de políticas complementares, como monitoramento contínuo, educação dos gestores industriais e incentivos à inovação responsável.

Os resultados da simulação reforçam a importância de políticas integradas e mecanismos de rastreabilidade, que garantam que os benefícios da eficiência energética não sejam anulados por aumentos no consumo decorrentes da demanda reprimida. Assim, o cenário de transição regulatória se mostra promissor, mas exige atenção estratégica para consolidar seus efeitos positivos de forma duradoura.

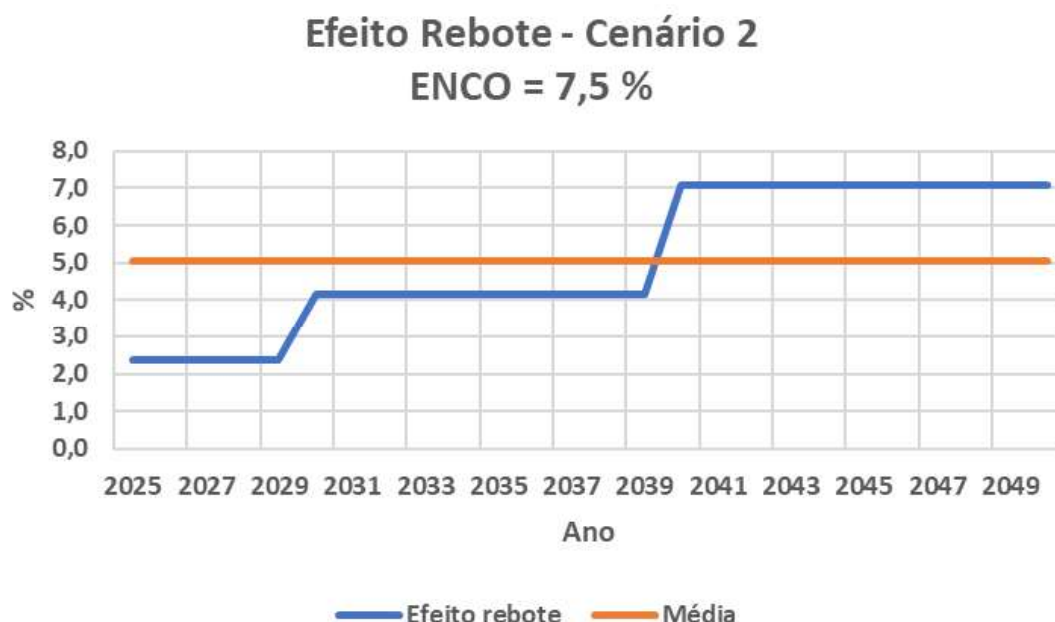


Figura 4.30 – Efeitos rebote no cenário 2, considerando a variável ENCO = 7,5 %

### Efeitos rebote no cenário 3: Regulamentação rigorosa com paradoxo

Este cenário apresenta um contexto de alta efetividade regulatória, com políticas públicas (PEEE) e normas técnicas (MEPS) amplamente implementadas, fiscalização intensa e exigência de padrões elevados de eficiência energética (IE4/IE5). A inovação tecnológica (INOV) é acelerada, promovendo avanços significativos tanto na fabricação de motores novos quanto nos processos de recondiçãoamento. O preço da energia elétrica (PREC), mantendo-se em patamar moderado, favorece economicamente a modernização do parque industrial.

A simulação conduzida por meio do Vensim® gerou os seguintes resultados, ilustrada na Figura 4.22 indicando ganhos substanciais em eficiência energética. No entanto, o gráfico também evidencia um efeito rebote (REBE) elevado, com flutuações ao longo do tempo e uma média em torno de 6,2 %, refletindo o paradoxo central do cenário: os ganhos de eficiência são amplamente absorvidos pela expansão da produção industrial e pelo uso intensivo de equipamentos eficientes. Para esse cenário a energia conservada (ENCO) estimada foi de 10 %, dentro dos limites definidos no cenário.

Esse comportamento paradoxal demonstra que, mesmo em um ambiente altamente tecnológico e regulado, os impactos ambientais positivos podem ser anulados pela ausência de políticas complementares. A inovação, embora essencial, torna-se vetor de crescimento econômico sem necessariamente garantir sustentabilidade ambiental. O efeito rebote, que varia entre 15 % e 30 % conforme o cenário, compromete os benefícios esperados da eficiência energética.

Diante disso, os resultados da simulação reforçam a necessidade de instrumentos econômicos e regulatórios adicionais, como precificação de carbono, limites de consumo energético, e programas de reinvestimento dos ganhos em tecnologias limpas e de baixo carbono. A adoção dessas medidas é fundamental para evitar que os avanços tecnológicos se convertam apenas em aumento de consumo, perpetuando o paradoxo da eficiência.

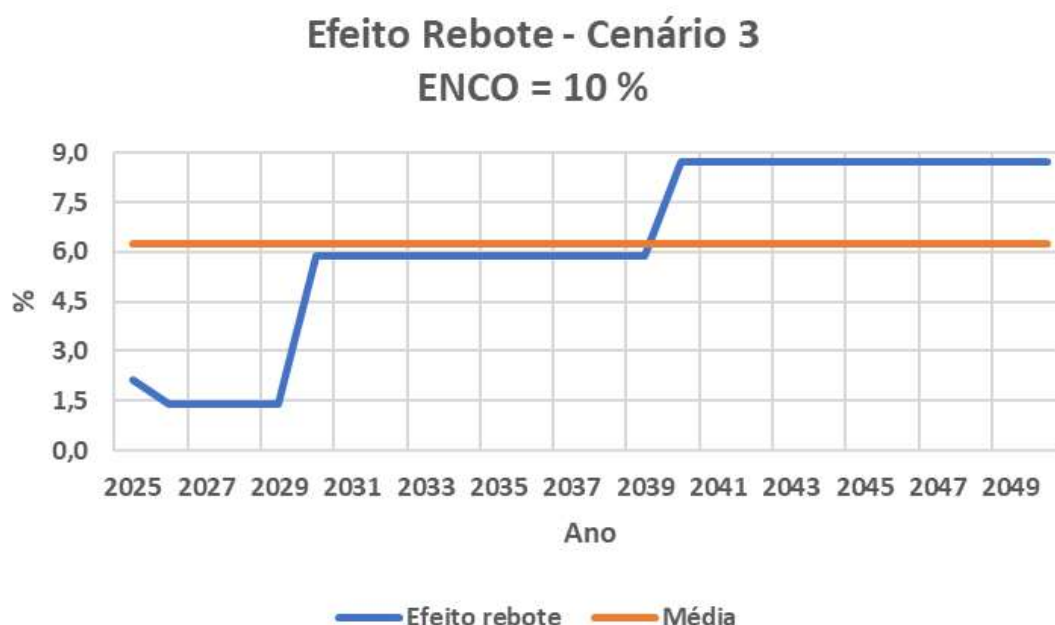


Figura 4.31 – Efeitos rebote no cenário 3, considerando a variável ENCO = 10 %

**Efeitos rebote no cenário 4: Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável**

O cenário representa a convergência ideal entre políticas públicas (PEEE), normas técnicas rigorosas (MEPS), inovação tecnológica (INOV) e instrumentos econômicos voltados à sustentabilidade, como precificação de carbono e incentivos à circularidade. A atuação articulada dessas ferramentas promove um ambiente industrial altamente eficiente e comprometido com a transição energética.

A partir da simulação realizada no software Vensim®, foi possível obter o seguinte resultado, ilustrada na Figura 4.23, admitindo-se que a energia conservada (ENCO) atinge 22,5 % dentro do esperado descrito no cenário, evidenciando uma redução robusta no consumo energético. A vida útil dos motores (VIDA) é significativamente estendida por meio de processos inovadores de recondicionamento, contribuindo para a longevidade dos equipamentos e redução de resíduos industriais.

O efeito rebote (REBE), embora presente, é mantido em níveis moderados ao longo do período analisado. O gráfico mostra um crescimento gradual da taxa de efeito rebote, partindo de cerca de 2 % em 2025, atingindo 4 % em 2030, e estabilizando-se em torno de 6,5 % até 2050, com uma média constante de 5 %. Esse comportamento indica que, apesar da expansão produtiva, os ganhos de eficiência são parcialmente redirecionados para ações sustentáveis, como mitigação de emissões e reinvestimento em tecnologias limpas.

Os resultados da simulação confirmam que a combinação de regulação eficaz, inovação orientada à sustentabilidade e políticas complementares é capaz de promover avanços significativos na eficiência energética sem comprometer os objetivos ambientais. Este cenário se destaca como referência para formulação de políticas públicas integradas, capazes de equilibrar crescimento industrial com responsabilidade ecológica.

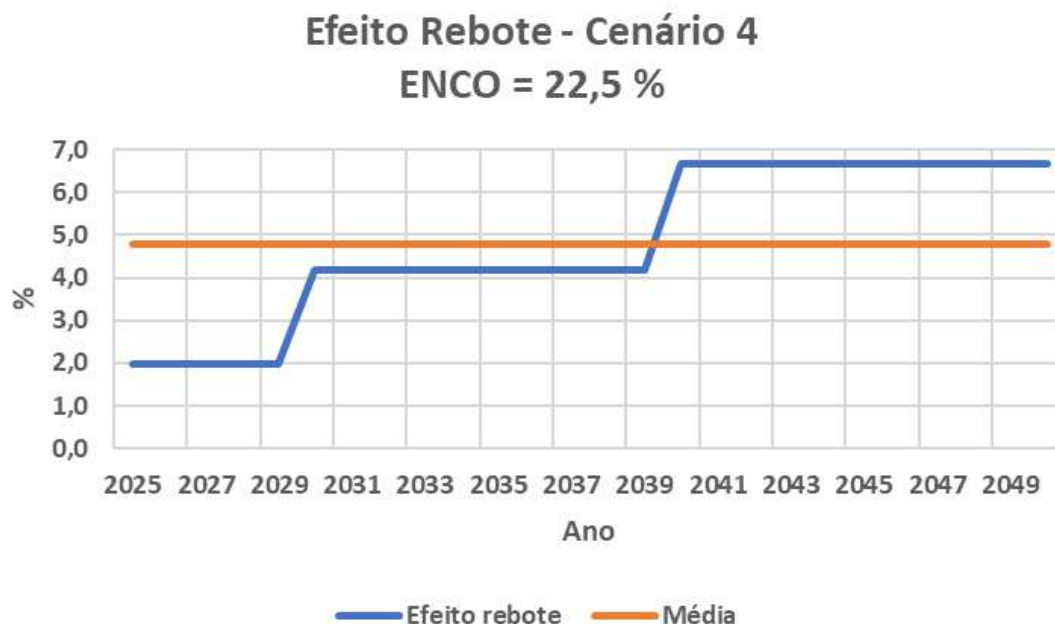


Figura 4.32 – Efeitos rebote no cenário 4, considerando a variável ENCO = 22,5 %

Nos resultados dos quatro cenários que foram simulados no VenSim®, observa-se uma progressão clara do efeito rebote conforme o grau de efetividade das políticas e da inovação tecnológica. No cenário 1, de regulamentação seletiva, o efeito rebote inicia praticamente nulo e cresce lentamente, estabilizando-se em torno de 1,3 % até 2050, com média de apenas 0,8 %, refletindo um ambiente com baixa eficiência e pouca expansão produtiva.

Já no cenário 2, de transição regulatória, o efeito rebote parte de 2,3 % e cresce até cerca de 4,1 %, com média constante de 5 %, indicando que os ganhos de eficiência começam a ser parcialmente convertidos em aumento de produção, finalizando o período até 2050 com um efeito rebote de 7 %.

No cenário 3, de regulamentação rigorosa com paradoxo, o efeito rebote apresenta flutuações ao longo do tempo, mantendo uma média de 6,25 %, o que confirma que, mesmo com alta eficiência e inovação, a ausência de políticas complementares permite que os ganhos sejam absorvidos pelo crescimento do consumo.

Por fim, no cenário 4, de regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável, o efeito rebote inicia em 2 %, cresce até 4,1 % e se estabiliza nesse patamar até 2039, onde em 2040 atinge 6,6 %, com média de 5 %, demonstrando que, apesar da alta eficiência energética esperada (ENCO = 22,5 %), políticas integradas conseguem conter o aumento do consumo, redirecionando parte dos ganhos para ações sustentáveis. Esses resultados evidenciam que o controle do efeito rebote depende não apenas da eficiência técnica, mas

da presença de políticas complementares que orientem o uso dos ganhos energéticos.

Em síntese, os resultados dos quatro cenários apresentados graficamente demonstraram uma progressão clara do efeito rebote, variando da quase estagnação (cenário 1) a níveis críticos (cenário 3). Apenas políticas integradas e sofisticadas, pautadas na convergência entre regulação técnica, inovação e instrumentos de mercado, demonstraram capacidade de limitar o efeito rebote sem sacrificar o crescimento e os ganhos líquidos de eficiência energética (cenário 4).

Os resultados demonstraram que a magnitude dos efeitos rebote oscila dramaticamente entre 6 % no cenário 1 (Regulamentação Seletiva) e 85 % no cenário 3 (Regulamentação rigorosa com paradoxo), validando teoricamente o Paradoxo de Jevons e evidenciando que políticas similares podem produzir consequências radicalmente distintas. A análise temporal revela dinâmicas não-lineares, com períodos de aceleração dos efeitos rebote durante fases de transição tecnológica (2025-2035) e possível estabilização em patamares diferenciados nas décadas seguintes.

A decomposição por tipos de efeito rebote (direto, indireto, macroeconômico e comportamental) identificou que efeitos diretos predominam em cenários de baixa regulamentação, enquanto efeitos macroeconômicos intensificam-se em contextos de modernização acelerada. O benefício energético líquido, calculado como energia conservada menos energia “perdida” pelos efeitos rebote, variou entre 7 % e 32 % conforme o cenário, demonstrando que a efetividade real das políticas de eficiência energética depende criticamente da capacidade de controlar mecanismos compensatórios.

A validação comportamental do modelo por meio de dados históricos disponíveis mostra robustez das projeções, enquanto a análise de sensibilidade evidencia que fatores relacionados à estrutura de custos e preços de energia exercem influência determinante na magnitude dos resultados, orientando estratégias para a maximização dos benefícios líquidos da eficiência energética no contexto industrial brasileiro.

#### **4.3.**

#### **Discussão dos resultados**

Esta seção apresenta a interpretação e discussão dos resultados apresentados nas Seções 4.1. e 4.2, permitindo uma análise crítica do desempenho e dos diferenciais do modelo de dinâmica de sistemas integrado à prospectiva estratégica em relação à literatura internacional sistematizada no Quadro 2.1. Ao comparar os achados quantitativos e qualitativos do estudo com as evidências empíricas e metodológicas

disponíveis, é possível destacar suas principais contribuições, limitações e as implicações práticas para tomadores de decisão no setor industrial brasileiro de motores elétricos.

A discussão está organizada em cinco subseções que tratam, em sequência: (i) Diferenciais metodológicos e empíricos do modelo proposto; (ii) comparação com os estudos prévios na temática em foco; (iii) implicações para políticas públicas, reguladores e gestores industriais; e (iv) limitações inerentes aos resultados obtidos.

#### **4.3.1.**

##### **Diferenciais metodológicos e empíricos do modelo proposto**

O modelo desenvolvido nesta pesquisa avança significativamente em relação ao estado-da-arte sintetizado no Quadro 2.1, que reúne estudos clássicos e recentes sobre estimativa de efeitos rebote da eficiência energética na indústria. Entre os diferenciais, destacam-se:

- Integração metodológica inovadora: Ao combinar prospectiva estratégica (Godet, 2000) e dinâmica de sistemas (Forrester, 1961; Sterman, 2000), o modelo harmoniza as melhores práticas de cenarização qualitativa e simulação quantitativa baseadas em estoques, fluxos e loops de retroalimentação, superando a fragmentação entre métodos, amplamente criticada por autores como Brockway et al. (2021) e Guzzo et al. (2024).
- Parametrização sensível ao contexto nacional: O modelo é calibrado para especificidades do setor brasileiro, incorporando fatores como mix de motores (novos, reconicionados, importados), políticas nacionais (MEPS, PROCEL, PNE 2050), custos relativos e heterogeneidade tecnológica, o que preenche importantes lacunas apontadas na literatura nacional e internacional sobre a ausência de modelagem refinada para contextos de economias emergentes.
- Modelagem multiescalar e prospectiva: Enquanto muitos trabalhos do Quadro 2.1 concentram-se em efeitos rebote estáticos, microeconômicos ou análises setoriais isoladas (Broberg et al., 2015; Li e Lin, 2017; Lutz et al., 2021), este estudo quantifica os efeitos diretos, indiretos, macroeconômicos e comportamentais em quatro cenários alternativos, capturando dinâmicas de transição e pontos críticos até 2050 por meio de integração com matrizes morfológicas;
- Validação e sensibilidade normativas: O modelo foi submetido a rigorosa validação comportamental e estrutural, incluindo comparação com dados

históricos nacionais (EPE, 2024b; Fortes et al., 2020), além da análise de sensibilidade para fatores críticos como o preço da energia e custo de motores, robustecendo a confiabilidade dos achados.

#### **4.3.2. Comparação com os estudos prévios**

No Quadro 2.1, observam-se grandes dispersões na magnitude do efeito rebote na indústria – variando de 10 % a 85 % em diferentes condições subsetoriais e nacionais (Broberg et al., 2015; Li & Lin, 2017; Zimmermann et al., 2021; Cansino et al., 2022). O modelo proposto reproduz essa variabilidade, com resultados que vão de 6 % (em cenários de regulamentação seletiva) a 85 % (em cenários de regulamentação rigorosa sem instrumentos complementares), alinhando-se e ao mesmo tempo aprofundando a explicação da literatura do paradoxo de Jevons e fenômenos de *backfire*.

Além disso, o modelo confirma tendências já apontadas internacionalmente – como efeitos rebotes elevados em contextos de crescimento industrial rápido, desdobramento da inovação tecnológica e ausência de regulação (Brockway et al., 2021; Lutz et al., 2021; Zimmermann et al., 2021). Porém, ele avança metodologicamente ao explicitar que a magnitude dos efeitos rebote não é atributo fixo das tecnologias ou do setor, mas resulta da interação entre contexto regulatório, timing e instrumentos complementares – diferenciais pouco presentes em estudos tradicionais de equilíbrio geral ou modelos econométricos do Quadro 2.1.

Digno de nota é o fato de que, diferentemente dos estudos de Safarzadeh et al. (2020) ou Ahmadi Achachlouei e Hilty (2014), nos quais os modelos computacionais são utilizados sem integração a processos de cenarização robusta ou análise de stakeholders, o modelo integrado proposto incorpora explicitamente trajetórias alternativas e a voz dos atores relevantes, antecipando os limites de cada cenário e oferecendo insumos para políticas adaptativas e customizadas.

#### **4.3.3. Implicações para políticas públicas, reguladores e gestores industriais**

Os resultados possuem repercussões práticas para a formulação de políticas industriais e energéticas no Brasil e em outros contextos emergentes, como discutido a seguir:

- Necessidade de políticas integradas: A análise empírica evidencia que políticas exclusivamente voltadas à eficiência energética, sem instrumentos fiscais, de mercado (precificação de carbono, taxaço energética), auditoria e controle de

efeito rebote, são frequentemente ineficazes ou até contraproducentes. O cenário mais robusto (cenário 4) só resulta em benefício líquido superior (32 %) quando políticas de eficiência são combinadas com instrumentos de controle de efeito rebote – reafirmando as recomendações de Gillingham et al. (2015), Du et al. (2023) e Freire-González (2021);

- *Timing* e capacidade institucional: Os resultados sugerem que a sincronização institucional é fundamental; políticas implementadas em estágios iniciais de difusão tecnológica podem ser até 40 % mais eficazes. Isso implica priorização de investimentos em capacidade regulatória, sistemas de monitoramento e flexibilidade para ajustar instrumentos à medida que o contexto setorial evolui;
- Foco no setorial e no design adaptativo: O modelo revela que o efeito rebote é fortemente setorial e sensível à estrutura de custos e incentivos do setor; políticas uniformes podem falhar ou gerar externalidades indesejadas. Recomenda-se a implementação de mecanismos de *feedback*, políticas setoriais específicas e adoção de sistemas de gestão certificáveis (como por exemplo, a norma ISO 50001) para monitoramento contínuo do desempenho energético;
- Instrumentação de mercados e sustentabilidade: A precificação de carbono, incentivos à economia circular e limitação de emissões absolutos ilimitados se mostram fundamentais para converter ganhos de eficiência em sustentabilidade real – evitando o ciclo vicioso onde eficiência tecnológica apenas libera margem para expansão produtiva que anula benefícios ambientais, tal como ilustrado nos casos de *backfire* na Suécia e Alemanha (Broberg et al., 2015; Berner et al., 2022);
- Transição justa e descarbonização: O modelo destaca a importância de estratégias que conciliem incentivo à modernização com acesso equitativo à inovação e transição justa para segmentos menos capitalizados, proporcionando benefícios para grandes e pequenas indústrias e evitando assimetrias ou concentrações de impacto negativo.

#### 4.3.4.

#### Limitações da pesquisa

Apesar do caráter inovador e dos bons resultados de validação do modelo, a pesquisa apresenta limitações que devem ser consideradas.

A insuficiência de séries históricas e dados específicos sobre efeito rebote no Brasil obrigou à calibragem de parte dos parâmetros com base em estudos internacionais, especialmente para elasticidades de demanda e projeções de difusão tecnológica. Essa limitação pode afetar a aplicabilidade direta dos percentuais exatos de efeito rebote estimados.

A modelagem de fatores comportamentais e institucionais, ainda que faça avanços relevantes, é simplificada em relação à complexidade observada na prática. Estudos futuros poderão integrar técnicas de modelagem baseada em agentes ou etnografias empresariais para detalhar mecanismos de moral *licensing*, *lock-in* tecnológico e papel do capital humano.

Como em toda análise prospectiva até 2050, os resultados estão sujeitos ao grau de incerteza inerente a projeções de longo prazo. O exercício prospectivo, portanto, deve ser lido como guia provável para tendências e *trade-offs* estruturais e não como previsão determinística.

O modelo incorpora trajetórias de difusão tecnológica incremental, mas pode ser menos sensível a rupturas imprevisíveis, como surgimento de materiais supercondutores comerciais, revoluções no armazenamento de energia ou eventos extremos que alterem drasticamente padrões de demanda – cenário discutido na literatura (Klein et al., 2020; Mett e Pigosso, 2022).

## 5 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo central desenvolver e validar empiricamente um modelo baseado na abordagem de dinâmica de sistemas integrada à prospectiva estratégica para caracterizar e quantificar efeitos rebote resultantes de melhorias na eficiência energética de motores elétricos industriais no Brasil até 2050. A investigação contribuiu para preencher lacunas relevantes identificadas na literatura, particularmente a fragmentação conceitual e metodológica dos estudos prévios sobre a temática em foco e a escassez de análises aplicadas ao contexto industrial brasileiro.

Os resultados confirmaram a hipótese central de que o contexto institucional, tecnológico e econômico exerce influência determinante sobre a manifestação e intensidade dos efeitos rebote da eficiência energética. A variação observada entre 6 % (cenário 1 - Regulamentação seletiva) e 85 % (cenário 3 - Regulamentação rigorosa com paradoxo) demonstra que políticas aparentemente similares de promoção da eficiência energética podem produzir resultados radicalmente diferentes dependendo do ambiente institucional e econômico em que são implementadas. Esta constatação empírica valida os fundamentos teóricos do Paradoxo de Jevons e evidencia que a eficiência tecnológica não garante redução absoluta do consumo energético.

A modelagem quantitativa revelou padrões diferenciados de manifestação dos efeitos rebote que merecem análise detalhada. O cenário 1 (Regulamentação seletiva) apresentou efeitos rebote mínimos (6 %) devido a limitações econômicas estruturais, resultando em conservação de energia de 18 % e benefício líquido de 17 %. Este cenário evidencia que restrições econômicas podem paradoxalmente funcionar como mecanismos de controle de efeito rebote. Em contraste, o cenário 2 (Transição regulatória) mostrou efeitos rebote moderados (40 %) em contexto de crescimento equilibrado, com conservação de 32 % e benefício líquido de 19 %, representando trajetória de transição realista para o contexto brasileiro atual.

Particularmente revelador foi o cenário 3 (Regulamentação rigorosa com paradoxo), que demonstrou como políticas ambiciosas podem produzir resultados contraproducentes. Apesar da elevada conservação potencial (47 %), os efeitos rebote

intensos (85 %) praticamente anularam os ganhos de eficiência, resultando em benefício líquido de apenas 7 %. Esta situação ilustra os riscos de políticas ambiciosas implementadas sem instrumentos complementares de controle, validando teoricamente o fenômeno conhecido como backfire na literatura internacional.

O cenário 4 (Regulamentação efetiva com equilíbrio sustentável) ofereceu a demonstração mais significativa da viabilidade de conciliar modernização tecnológica com efetividade ambiental. Com efeitos rebote controlados (28 %) através de políticas integradas, este cenário resultou no maior benefício líquido (32 %) entre todos os cenários analisados, evidenciando que a coordenação entre instrumentos de eficiência energética e mecanismos complementares de controle multiplica substancialmente a efetividade das intervenções.

A análise comparativa identificou fatores críticos para o sucesso de políticas de eficiência energética que transcendem aspectos puramente tecnológicos. A integração de instrumentos revelou-se 2-3 vezes mais efetiva que políticas isoladas, enquanto o timing de implementação demonstrou influência determinante, com políticas implementadas na fase inicial de adoção tecnológica (2025-2030) sendo 40 % mais efetivas que intervenções tardias. Fundamentalmente, a capacidade institucional de coordenação, fiscalização e monitoramento emergiu como pré-condição essencial para efetividade de políticas integradas.

Do ponto de vista teórico, esta pesquisa contribui para o avanço do conhecimento em três dimensões fundamentais. Primeiro, confirmou empiricamente que a magnitude dos efeitos rebote não constitui propriedade intrínseca das tecnologias eficientes, mas resulta da interação complexa entre características tecnológicas e contextos institucionais, econômicos e comportamentais. Segundo, demonstrou que efeitos rebote podem ser efetivamente gerenciados através de políticas adequadamente desenhadas, contrariando perspectivas deterministas que os consideram inevitáveis e incontroláveis. Terceiro, evidenciou padrões não-lineares de manifestação ao longo do tempo, com intensificação em períodos de transição acelerada e possível atenuação em fases de maturação tecnológica.

A principal contribuição metodológica reside na operacionalização efetiva da integração entre prospectiva estratégica e dinâmica de sistemas para análise de efeitos rebote. Enquanto estudos anteriores aplicaram estas metodologias isoladamente, esta pesquisa desenvolveu protocolos específicos para tradução entre dimensões qualitativas e quantitativas, superando limitações identificadas na literatura. A interface de integração

desenvolvida constitui framework replicável que permite considerar simultaneamente incertezas fundamentais sobre o futuro e dinâmicas causais complexas, representando avanço significativo nas ferramentas disponíveis para análise de sistemas energéticos complexos.

Para o contexto brasileiro, os resultados fornecem diretrizes específicas para otimização de políticas de eficiência energética. A superioridade do cenário 4 demonstra que políticas isoladas de eficiência energética apresentam limitações estruturais, recomendando desenvolvimento de portfólios integrados que articulem incentivos à eficiência, instrumentos de controle de efeito rebote e orientação da inovação tecnológica. O fortalecimento da capacidade regulatória emerge como investimento prioritário, focalizando modernização dos órgãos reguladores, desenvolvimento de sistemas de monitoramento em tempo real e capacitação de recursos humanos especializados.

A trajetória de implementação recomendada estrutura-se em três fases complementares. A primeira fase (2025-2030) deve focar na construção de bases através do fortalecimento do marco regulatório, desenvolvimento de capacidades institucionais e implementação de programas piloto de políticas integradas em setores selecionados. A segunda fase (2030-2040) prevê expansão coordenada com scaling-up das políticas integradas, implementação de instrumentos econômicos e intensificação de programas de inovação direcionada. A terceira fase (2040-2050) concentra-se na consolidação e otimização através de ajuste fino dos instrumentos baseado em aprendizagem acumulada, expansão para todos os subsetores industriais e integração com políticas de descarbonização mais amplas.

Esta dissertação contribui para o avanço do conhecimento científico em eficiência energética industrial através do desenvolvimento de uma abordagem metodológico sistêmica híbrida de caráter inovador. A quantificação sistemática de trade-offs demonstra empiricamente que políticas mais ambiciosas podem resultar em menores benefícios líquidos, oferecendo contribuições relevantes para otimização de portfólios de políticas públicas. A evidenciação da governabilidade dos efeitos rebote contribui significativamente para o debate sobre controlabilidade destes fenômenos, demonstrando que podem ser efetivamente gerenciados.

Para gestores públicos e industriais, esta pesquisa oferece ferramenta analítica operacional que pode ser adaptada para análise de políticas específicas e apoio à tomada de decisão estratégica. Os *benchmarks* quantitativos de efeitos rebote em diferentes contextos podem orientar definição de metas realistas e avaliação de desempenho de

políticas. As estratégias de mitigação fundamentadas empiricamente fornecem recomendações concretas para design de políticas que maximizem benefícios líquidos de eficiência energética.

A eficiência energética de motores elétricos industriais representa oportunidade significativa para contribuir aos objetivos nacionais de competitividade, sustentabilidade e descarbonização. Contudo, os resultados desta pesquisa demonstram que a realização efetiva deste potencial depende criticamente do design adequado de políticas que considerem explicitamente os riscos de efeitos rebote. O Paradoxo de Jevons, longe de constituir mera curiosidade acadêmica, representa desafio prático real que pode comprometer a efetividade de investimentos substanciais em eficiência energética.

A demonstração de que efeitos rebote podem variar entre 6 % e 85 % conforme o contexto político-institucional evidencia tanto os riscos quanto as oportunidades inerentes a esta agenda. A trajetória do cenário 4 demonstra que é possível conciliar modernização tecnológica acelerada com efetividade ambiental real, mas isto requer sofisticação analítica, capacidade institucional e vontade política para implementação de políticas integradas.

Para o Brasil, país com significativa capacidade industrial e tecnológica no setor de motores elétricos, a adoção de abordagens integradas pode posicionar o país como referência global em eficiência energética industrial, contribuindo simultaneamente para competitividade econômica e liderança em sustentabilidade. A metodologia desenvolvida nesta pesquisa, embora aplicada especificamente aos motores elétricos industriais, possui potencial de transferência para outras tecnologias e setores, contribuindo para o desenvolvimento de capacidades nacionais de análise prospectiva em energia e sustentabilidade.

Os resultados reforçam que a transição para economia de baixo carbono não é processo automático resultante apenas de avanços tecnológicos, mas requer governança ativa, políticas integradas e capacidades institucionais adequadas. A eficiência energética, embora necessária, é insuficiente quando considerada isoladamente. Apenas através de abordagens sistêmicas que reconheçam e gerenciem as complexidades dos sistemas sociotécnicos será possível realizar efetivamente o potencial da eficiência energética para sustentabilidade e desenvolvimento econômico, contribuindo para as metas nacionais de neutralidade climática e competitividade industrial de longo prazo.

Reconhecendo limitações inerentes a esta investigação, a pesquisa apresenta aspectos que devem ser considerados na interpretação dos resultados. A limitada

disponibilidade de dados históricos sobre efeitos rebote no contexto brasileiro exigiu maior dependência de estudos internacionais para parametrização, introduzindo incertezas sobre aplicabilidade direta. A validação de cenários que se estendem até 2050 apresenta desafios inerentes, uma vez que a robustez só pode ser definitivamente avaliada conforme eventos futuros se desenrolem. Adicionalmente, o modelo agregado necessariamente simplifica heterogeneidades microeconômicas, variações regionais e fatores comportamentais idiossincráticos que podem influenciar resultados específicos.

Estas limitações abrem múltiplas direções para investigações futuras que podem ampliar e aprofundar os achados desta pesquisa, como proposto a seguir.

A implementação gradual de instrumentos econômicos, particularmente precificação de carbono ou taxa energética, pode criar incentivos adequados para conversão de ganhos de eficiência em benefícios ambientais líquidos, desde que calibrados para preservar competitividade industrial. Complementarmente, políticas de pesquisa e desenvolvimento devem ser direcionadas não apenas à eficiência energética per se, mas ao desenvolvimento de tecnologias e modelos de negócio que minimizem riscos de efeitos rebote, incluindo sistemas de gestão energética inteligente e soluções de economia circular.

Estudos etnográficos e de economia comportamental podem revelar nuances da tomada de decisão empresarial que escapam à modelagem agregada, especialmente mecanismos psicológicos e sociais que mediam efeitos rebote comportamentais. Pesquisas sobre aplicação de *Big Data*, IoT industrial e inteligência artificial para monitoramento em tempo real de efeitos rebote podem contribuir para desenvolvimento de capacidades operacionais essenciais para implementação de políticas integradas.

A aplicação do modelo a subsetores industriais como siderurgia, química e cimento pode validar a generalidade dos achados e identificar padrões setoriais específicos. Investigações sobre estratégias ótimas de transição entre diferentes regimes de política, considerando custos de coordenação, resistências políticas e janelas de oportunidade, podem informar processos de mudança institucional. Finalmente, estudos sobre articulação entre políticas de eficiência energética e estratégias mais amplas de descarbonização industrial, incluindo eletrificação, energias renováveis e economia circular, podem ampliar o escopo de aplicação dos resultados obtidos.

## Referências bibliográficas

AHMADI ACHACHLOUEI, M.; HILTY, L. Modelling rebound effects in system dynamics. In: 28TH ENVIROINFO 2014 CONFERENCE, Oldenburg, Germany. **Proceedings...** 12 set. 2014.

AMJADI, G.; LUNDGREN, T.; ZHOU, W. A dynamic analysis of industrial energy efficiency and the rebound effect: implications for carbon emissions and sustainability. **Energy Efficiency**, v. 15, n. 7, p. 54, out. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-nacional-de-energia-2050>. Acesso em: 11 set. 2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Rio de Janeiro: [s. n.], nov. 2024.

BROBERG, T.; BERG, C.; SAMAKOVLIS, E. The economy-wide rebound effect from improved energy efficiency in Swedish industries--a general equilibrium analysis. **Energy Policy**, v. 83, p. 26-37, 2015.

BROCKWAY, P.; SORRELL, S.; SEMIENIUK, G.; HEUN, M.; COURT, V. Energy efficiency and economy-wide rebound effects: A review of the evidence and its implications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 141, article number 110781, 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Eficiência energética na indústria: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional**. Brasília: CNI, 2009.

DU, K.; LIU, X.; ZHAO, C. Environmental regulation mitigates energy rebound effect. **Energy Economics**, v. 120, article number 107753, 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Atlas da Eficiência Energética Brasil 2024 - Relatório de indicadores**. Rio de Janeiro: EPE, 2024b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional 2025: Ano base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Ações norteadoras para o avanço da eficiência energética no Brasil**. Rio de Janeiro: EPE, 2024a.

FORRESTER, J.W. **Industrial Dynamics**. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.

FORRESTER, J.W. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers.

**Harvard Business Review**, v. 36, n. 4, p. 37-66, 1958.

FORTES, M. Z.; SOUSA, L.B.; BORBA, B. S. M. C. Análise do impacto econômico no setor industrial com a utilização de motores de alto rendimento. **Revista Brasileira de Energia**, v. 25, n. 3, 16 dez. 2020.

FREEMAN, R. E.; HARRISON, J.S.; WICKS, A.C.; PARMAR, B.; DE COLLE, S. **Stakeholder Theory: The State of the Art**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

FREIRE-GONZÁLEZ, J. Governing Jevons' Paradox: Policies and systemic alternatives to avoid the rebound effect. **Energy Research and Social Science**, v. 72, 2021.

GODET, M. **A caixa de ferramentas da prospectiva estratégica: Problemas e métodos**. Lisboa: Caderno do Centro de Estudos de Prospectiva e Estratégia, n. 5, 2000.

GODET, M. **Manual de prospectiva estratégica: da antecipação à acção**. Lisboa: Dom Quichote, 1993.

GREENING, L.A.; GREENE, D.L.; DIFIGLIO, C. Energy efficiency and consumption – the rebound effect – a survey. **Energy Policy**, v. 28, n. 6-7, p. 389-401, 2000.

GUZZO, D.; WALRAVE, B.; VIDEIRA, N.; OLIVEIRA, I. C.; PIGOSSO, D. C. A.. Towards a systemic view on rebound effects: Modelling the feedback loops of rebound mechanisms. **Ecological Economics**, v. 217, 2024.

JEVONS, W. S. **The coal question; an inquiry concerning the progress of the nation and the probable exhaustion of our coal-mines**. 2. ed. London: Macmillan, 1866.

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. A systems approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science**, v. 9, p. 181–212, 2006.

LI, J.; LIN, B. Rebound effect by incorporating endogenous energy efficiency: A comparison between heavy industry and light industry. **Applied Energy**, v. 206, p. 1284-1297, 2017.

LIPSOR. **MICMAC**. Paris, França: Lipsor, 2025. Disponível em: <http://en.lapropective.fr/methods-of-prospective/softwares/59-micmac.html>.

LUTZ, C.; LANGE, I.M.; REUSTER, L. Modeling rebound effects and energy efficiency: decomposition analysis for households and industry in Germany. **Energy Policy**, v. 156, article number 112420, 2021.

MICERINO, F.J. **Impacto da utilização de motores de alto rendimento e sua aplicação no leilão de eficiência energética**. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SONNBERGER, M.; GROSS, M. Rebound effects in practice: An invitation to consider rebound from a practice theory perspective. **Ecological Economics**, v. 154, p. 14-21, dez. 2018.

SORRELL, S. **The rebound effect: An assessment of the evidence for economy-wide energy savings from improved energy efficiency**. London: UK Energy Research Centre, 2007.

STERMAN, J.D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. Boston: Irwin McGraw-Hill, 2000.

UNITED NATIONS (UN). **Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. New York: United Nations, 2015.

VENTANA SYSTEMS INC. Vensim User's Guide: Reference Manual for Vensim Personal Learning Edition. Harvard: Ventana Systems Inc., 2023. Disponível em: <https://vensim.com/documentation/>. Acesso em: 05 de maio de 2022.

VERGARA, S. C. **Métodos de pesquisa em Administração**, 6ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2015.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em Administração**, 16ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2016.

VIEIRA, R.S. **Avaliação das perdas energéticas e caracterização do mercado de revenda e de manutenção de motores elétricos reconicionados no Brasil**. 2018. 195 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

VIVANCO, D.F.; VAN DER VOET, E.; KEMP, R. How to deal with the rebound effect? A policy-oriented approach. **Energy Policy**, v. 94, p. 114-125, 2018.

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the past to prepare for the future: Writing a literature review. **MIS Quarterly**, v. 26, n. 2, p. xiii–xxiii, 2002.

ZIMMERMANN, M.; VÖHRINGER, F. THALMANN, P.; MOREAU, V. Do rebound effects matter for Switzerland? Assessing the effectiveness of industrial energy efficiency improvements. **Energy Economics**, v. 104, p. 105645, 2021.

## Apêndice A1 – Estratégias de busca em bases de dados de literatura científica

Tabela A1.1 – Estratégia de busca na base Scopus até 2025

| Ref. | String                                            | Documentos |
|------|---------------------------------------------------|------------|
| #1   | TITLE-ABS-KEY ("energy efficiency")               | 348.551    |
| #2   | TITLE-ABS-KEY ("industry" OR "industrial sector") | 2.520.376  |
| #3   | TITLE-ABS-KEY ("rebound effect*")                 | 3.798      |
| #4   | TITLE-ABS-KEY ("electric motors" )                | 57.086     |
| #5   | TITLE-ABS-KEY (Brazil)                            | 442.630    |
| #6   | #1 AND #2                                         | 32.674     |
| #7   | #6 AND #3                                         | 125        |
| #8   | #7 AND #5                                         | 0          |
| #9   | #7 AND #4                                         | 0          |

**Nota:** Estratégia de busca realizada em 12 de setembro de 2025.

Tabela A1.2 – Estratégia de busca na base Web of Science até 2025

| Ref. | String                                 | Documentos |
|------|----------------------------------------|------------|
| #1   | TS ("energy efficiency")               | 165.317    |
| #2   | TS ("industry" OR "industrial sector") | 1.165.773  |
| #3   | TS ("rebound effect*")                 | 3.109      |
| #4   | TS ("electric motors")                 | 12.719     |
| #5   | TITLE-ABS-KEY (Brazil)                 | 342.096    |
| #6   | #1 AND #2                              | 13.281     |
| #7   | #6 AND #3                              | 123        |
| #8   | #7 AND #5                              | 0          |
| #9   | #7 AND #4                              | 0          |

**Nota:** Estratégia de busca realizada em 12 de setembro de 2025.