



Proposição de novas políticas públicas para a Eficiência energética industrial no Brasil

Volume 1

Estimativas do potencial de mercado para eficiência energética térmica nas indústrias

Produto elaborado para:

Departamento de Informações, Estudos e Eficiência Energética, Ministério de Minas e Energia (MME); Secretaria de Economia Verde, Descarbonização e Bioindústria, Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços (MDIC).

Responsável:

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1402 - 14º andar
Ed. Brasília Trade Center
70711-902 Brasília - DF, Brasil

Elaborado por:

Facto Energy / PUC-Rio.

Equipe:

Roberto Velásquez e Rodrigo Flora Calili (Coordenadores), Douglas Rischter, Felipe Leite, Guilherme Dantas, Maria Fatima Ludovico da Gama e Souza, Raymundo Aragão, Renato Ferreira, Ricardo Lima, Samuel Santos e Isabella Rocha.

Esse documento foi elaborado no âmbito do PotencializEE – Programa de Investimentos Transformadores em Eficiência Energética na Indústria – com o intuito de promover Eficiência Energética em Pequenas e Médias Empresas industriais no Brasil. O PotencializEE faz parte da Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável e é coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) na qualidade do parceiro político, o MDIC e a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Conta com recursos de múltiplos doadores através da *Mitigation Action Facility*, um mecanismo de financiamento de descarbonização dos seguintes doadores: Ministério Alemão para Assuntos Econômicos e Ação Climática (BMWK); Departamento de Segurança Energética e Net Zero do Reino Unido (DESNZ); Ministério do Clima, Energia e Serviços Públicos da Dinamarca (KEFM); Ministério das Relações Exteriores da Dinamarca (MFA); União Europeia e Fundação do Fundo de Investimento para Crianças (CIFF).

Coordenação:

Marco Schiewe (GIZ)
Joice Pereira (GIZ)

Revisão:

Samira Sana Fernandes de Sousa Carmo (MME)
Alexandra Albuquerque Maciel (MME)

2023

1. Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelo(s) autor(es). No entanto, erros com relação ao conteúdo não podem ser evitados. Consequentemente, nem a GIZ ou o(s) autor(es) podem ser responsabilizados por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo direto ou indireto resultante do uso ou confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo, ou direta ou indiretamente resultante dos erros, imprecisões ou omissões de informações neste estudo.

2. A duplicação ou reprodução de todo ou partes do estudo (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais é permitida, desde que a GIZ seja citada como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição de todo ou partes deste estudo, é necessário o consentimento escrito da GIZ.



Sumário

1. Introdução.....	10
1.1 Objetivos.....	12
1.2 Escopo do Trabalho	12
1.3 Principais Referências.....	16
2. Descritivo Setorial.....	17
2.1 Caracterização Energética Setorial.....	17
2.2 Emissões na indústria	21
3. Cenários Macroeconômicos.....	23
3.1 Abordagem Metodológica	23
3.2 Revisão de Estudos que Abordam Perspectivas da Economia Brasileira.....	25
3.3 Cenários para Indústria Brasileira.....	32
3.4 Cenário de Referência	32
3.5 Cenário Superior	34
3.6 Cenário Inferior.....	36
3.7 Comparação entre Cenários	38
3.8 Considerações sobre Cenários Macroeconômicos.....	40
4. Modelo <i>Top-down</i> e <i>Bottom-up</i>	41
4.1 Visão geral do modelo proposto	41
4.2 Detalhamento do modelo proposto – <i>Top-down</i> / <i>Bottom-up</i>	46
4.2.1 O modelo <i>Top-down</i>	46
4.2.2 O modelo <i>Bottom-up</i>	48
5. Resultados.....	65
5.1 Consolidação dos resultados	65
5.2 Resultados específicos para o setor de papel e celulose para o energético gás natural.....	68
5.3 Resultados consolidados para o setor de papel e celulose.....	71
5.4 Resultados consolidados para todos os segmentos industriais estudados.....	74
5.4.1 Resultados energéticos consolidados.....	74
5.4.2 Emissões de Gases de Efeito Estufa.....	78
5.5 Validação dos resultados	83
5.6 Mapa interativo.....	89
6. Conclusão.....	94



Apêndices.....	97
Apêndice A – Cenários macroeconômicos	97
Cenário de Referência	97
Cenário Superior	98
Cenário Inferior.....	99
Apêndice B – Modelagem estatística e validação.....	100
Validação física do modelo	102
Validação estatística do modelo.....	103
Apêndice C – Parâmetros do modelo	112
Força motriz.....	112
Aquecimento indireto.....	112
Aquecimento direto	113
Conversão de energia elétrica em energia térmica para aquecimento indireto	113
Produção de frio com energia elétrica	114
Produção de frio com energia térmica	115
Parâmetros para Avaliação das Perdas Energéticas.....	116
Apêndice D – Tutorial do Mapa Interativo.....	135
Anexo	155
Anexo A – Tabela da distribuição <i>t-student</i>	155
Anexo B – Tabela da distribuição F	156
Bibliografia.....	157



Índice de siglas e acrônimos

PDE – Plano Decenal de Expansão de Energia
PNE – Plano Nacional de Energia
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
BEU – Balanço de Energia Útil
PDEf – Plano Decenal de Eficiência Energética
PIB – Produto Interno Bruto
MME – Ministério de Minas e Energia
BEN – Balanço Energético Nacional
GLP – Gás Liquefeito Natural
IMF – International Monetary Fund
ANP – Agência Nacional do Petróleo
CNI – Confederação Nacional da Indústria
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
OFS – Outras Fontes Secundárias
EEM – Medida Eficiência Energética
EEMs - Medidas de Eficiência Energética
EE - Eficiência Energética
IEA - International Energy Agency
IRENA - International Renewable Energy Agency
SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
IMF – International Monetary Fund



Índice de tabelas

Tabela 1: Potencial de economia de energia no setor industrial	11
Tabela 2 - Segmentos industriais por estudo	14
Tabela 3: Consumo energético por setor.	18
Tabela 4 - Premissas dos Cenários Econômicos do PDE 2031.....	27
Tabela 5 - Diretrizes para os Cenário de Longo Prazo da Economia Brasileira do PNE 2050 Fonte: EPE (2018).....	30
Tabela 6 - Taxas de Crescimento Anual Médio (%) para Setores da Indústria Brasileira no Cenário “referência”	34



Índice de figuras

Figura 1: Participação dos energéticos no setor industrial em 2021.....	19
Figura 2: Participação dos energéticos no setor industrial em 2021.....	19
Figura 3: Variação em % do consumo energético por segmento do setor industrial.....	20
Figura 4: Participação dos segmentos no consumo de energia do setor industrial.....	20
Figura 5: Emissões de gases de efeito estufa do Brasil entre 1990 e 2020.....	21
Figura 6: Emissões de gases de efeito estufa nos segmentos industriais.....	22
Figura 7 - Evolução do PIB com Desagregação Setorial no PDE 2031 - Fonte: EPE (2021)	28
Figura 8 - Desagregação da Crescimento da Atividade Industrial Fonte: EPE (2021).....	29
Figura 9 - Crescimento da Economia Brasileira estimado pelo PDE 2031 com Abertura Setorial Fonte: EPE (2021).....	29
Figura 10 - Evolução do PIB com Desagregação Setorial no Cenário Inferior do PNE 2050 Fonte: EPE (2018).....	31
Figura 11 - Evolução do PIB com Desagregação Setorial no Cenário Superior do PNE 2050 Fonte: EPE (2018).....	31
Figura 12 - Evolução Prospectada da Indústria Extrativa Brasileira.....	38
Figura 13 - Evolução Prospectada da Indústria de Transformação Brasileira.....	39
Figura 14 - Evolução Prospectada da Indústria de Transformação Energointensiva Brasileira.	39
Figura 15 - Evolução Prospectada das Demais Indústrias de Transformação no Brasil.....	40
Figura 16 - Visão geral da modelagem proposta.....	42
Figura 17. Curvas de difusão tecnológica.....	44
Figura 18 - Árvore de cenários (considera todos os possíveis cenários).....	45
Figura 19 - Fluxograma da metodologia híbrida Top-Down / Bottom-Up.....	46
Figura 20 - Modelagem convencional dos fluxos energéticos.....	49
Figura 21 - Diagrama de Sankey genérico adotado neste trabalho.....	52
Figura 22 - Relação entre o máximo COP possível e o COP de Carnot para diferentes valores de ΔT e T_L e T_H	54
Figura 23 - Curvas de difusão tecnológica autônoma e técnica.....	57
Figura 24 - Projeção do PIB do setor de Celulose & Papel.....	66
Figura 25 - Resultados consolidados para o setor de Papel e Celulose para o energético Gás Natural.....	68
Figura 26 - Filtro de possíveis para resultados.....	69
Figura 27 - Resultados consolidados para os filtros implementados.....	69
Figura 28 - Diagrama de Pareto para os resultados preliminares.....	70
Figura 29 - Correlação entre produção setorial e consumo do energético – cenário superior.	70
Figura 30 - Correlação entre produção setorial e consumo do energético – cenário de referência.....	71
Figura 31 - Correlação entre produção setorial e consumo do energético – cenário inferior.	71
Figura 32 - Diagrama de Pareto para a energia recuperável no segmento de Papel e Celulose.	72



Figura 33 - Resultados gerais para o segmento de Papel e Celulose.	73
Figura 34 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020).	73
Figura 35 - Resultados gerais em termos energéticos para todos os segmentos industriais estudados e para todos os energéticos.....	75
Figura 36 – Diagrama de Pareto para a energia recuperável considerando todos os segmentos industriais analisados	76
Figura 37 - Resultados gerais para todos os segmentos industriais estudados e específico para Coque de Carvão Mineral.....	77
Figura 38 - Resultados gerais em termo de emissões para todos os segmentos industriais estudados e para todos os energéticos.....	80
Figura 39 – Diagrama de Pareto para a emissão de CO _{2eq} evitada devido a energia recuperável considerando todos os segmentos industriais analisados.....	81
Figura 40 - Resultados gerais para todos os segmentos industriais estudados e específico para OFS Petróleo.....	82
Figura 41 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Celulose & Papel. ..	83
Figura 42 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Não Ferrosos.	83
Figura 43 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento Têxtil.	84
Figura 44 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Cimento.....	84
Figura 45 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Alimentos e Bebidas.	84
Figura 46 - - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento Químico.	85
Figura 47 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Mineração e Pelotização.	85
Figura 48 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Ferro Gusa e Aço... ..	85
Figura 49 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Cerâmica e Vidro. ..	85
Figura 50 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Celulose & Papel.	86
Figura 51 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Não Ferrosos.....	86
Figura 52 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento Têxtil.....	87
Figura 53 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Cimentos.	87
Figura 54 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Alimentos e Bebidas.....	87



Figura 55 - - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento Químico.....	87
Figura 56 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Mineração e Pelotização.	87
Figura 57 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Ferro Gusa e Aço.	88
Figura 58 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Cerâmica e Vidro.....	88
Figura 59 – Mapa interativo	93
Figura D960 – Filtro para seleção do uso final	143
Figura 61 – Compartilhamento das informações	152



1. Introdução

Em 2010, a Eletrobras em conjunto com a Confederação Nacional das Indústrias realizou um estudo sobre eficiência energética industrial no Brasil (Eletrobras/CNI, 2010) com o objetivo de entender o que foi feito no país, oportunidades de redução de custos e experiência internacional. As principais conclusões deste estudo foram:

- A indústria não é prioridade nos programas governamentais de eficiência energética apesar de ser o maior consumidor de energia;
- A economia de energia em ações de eficiência energética no setor industrial gera benefícios para toda a sociedade;
- O foco de atuação das iniciativas governamentais de eficiência energética industrial precisa ser ajustado;
- Setores industriais intensivos em consumo de energia de países concorrentes do Brasil no mercado internacional recebem apoio de seus governos para desenvolver projetos de eficiência energética; e
- O momento é propício para maior dinamismo nas ações de eficiência energética no setor industrial.

Avanços importantes foram conseguidos ao longo dos últimos anos, mas se observa na experiência prática que, ainda, as conclusões do estudo permanecem atuais.

Ainda em relação a este estudo, foi constatado que mais de 80% do potencial de economia de energia no setor industrial se concentra em sistemas térmicos, conforme apresentado na Tabela 1. Sob outra perspectiva, em termos de potencial de evitar o desperdício de energia elétrica, o maior potencial está em sistemas motrizes.



Tabela 1: Potencial de economia de energia no setor industrial

	Usos industriais da energia	Potencial de economia (tep)	Representação no total de economia (%)	Setores com maior potencial de eficiência
	Total	14.655.855,67	100,00%	
Combustíveis	Aquecimento direto – Fornos	9.103.661,52	62,12%	Siderurgia Cerâmico Cimento
	Aquecimento direto – Secadores	415.466,80	2,83%	Cerâmico Alimentos e bebidas Têxtil
	Vapor de processo – Caldeiras	2.358.183,02	16,09%	Papel e celulose Têxtil Alimentos e bebidas Siderurgia
	Outros	74.679,61	0,51%	Químico
Energia elétrica	Força motriz	2.032.439,53	13,87%	Siderurgia Extrativa mineral Alimentos e bebidas
	Refrigeração	46.581,66	0,32%	Alimentos e bebidas Químico Têxtil
	Fornos elétricos	370.873,53	2,53%	Siderurgia Metais não ferrosos Ferros ligas
	Eletrólise	191.387,34	1,31%	Metais não ferrosos Química Papel e celulose
	Iluminação	60.214,47	0,41%	Alimentos e bebidas Têxtil Extrativa mineral Papel e celulose
	Outros	2.368,18	0,02%	Extrativa mineral

Fonte: Eletrobras/CNI, 2010

Tendo em vista este preâmbulo, a GIZ contratou a elaboração do presente trabalho que foi dividido em três frentes que visam:

- I) Promoção da eficiência energética industrial em energia térmica por meio de estudos técnicos e um plano de ação detalhado de políticas públicas;
- II) Proposta de aperfeiçoamento do PEE (Programa de Eficiência Energética da Aneel) para desenvolvimento de projetos no setor industrial;
- III) Levantamento e apresentação dos co-benefícios econômico-financeiros, ambientais e sociais dos projetos de eficiência energética (EE) viabilizados pelo PotencializEE, para a promoção da eficiência energética industrial em energia térmica por meio de estudos técnicos e um plano de ação detalhado de políticas públicas.

No que tange a frente I, um dos objetivos é estimar o potencial de mercado para EE térmica nas indústrias. Para tanto, a metodologia para se estimar tanto os potenciais técnico e econômico (explorado e a ser explorado) para EE térmica no setor industrial brasileiro com



foco nas PMEs, contemplando a análise exergética e termoeconômica, adotará modelos de previsão do tipo *bottom-up* associada a modelos *top-down*

1.1 Objetivos

No que tange à frente de trabalho para a promoção da eficiência energética industrial em energia térmica por meio de estudos técnicos e um plano de ação detalhado de políticas públicas. Foram estabelecidos os seguintes objetivos a seguir:

- I) Análise histórica e quantitativa do potencial de mercado para EE e medidas de descarbonização em sistemas térmicos industriais, incluindo cenários com projeções de crescimento nacional desse setor.
- II) Avaliação e apresentação de opções regulatórias e de políticas públicas que possam proporcionar novos incentivos para a realização de investimentos em EE em sistemas térmicos industriais com foco no potencial de mercado identificado no objetivo I.
- III) Avaliação de impactos macroeconômico, ambiental e social (diretos e indiretos) decorrentes da adoção de novas políticas públicas para EE térmica industrial.
- IV) Apresentação de resultados iniciais e realização de atividades (workshops) para engajamento de atores-chave (PMEs, associações do setor, órgãos regulatórios etc.).
- V) Sugestão de metas e de plano de ação detalhado para implementação das sugestões apresentadas no objetivo II.

Especificamente, neste relatório, serão apresentados os resultados dos modelos de previsão do tipo *bottom-up* associada a modelos *top-down* para que o objetivo I descrito acima seja alcançado.

1.2 Escopo do Trabalho

No Brasil, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o setor industrial é dividido em onze subsetores de acordo com a atividade desenvolvida (BEN, 2022). Todavia, outras fontes de informações consideram aberturas distintas, conforme a disponibilidade dos dados e seus interesses. Para fins deste trabalho, foram considerados os segmentos industriais a seguir:

- Cimento;
- Ferro gusa e aço;
- Mineração e pelletização;
- Não-ferrosos e outros da metalurgia;
- Química;
- Alimentos e bebidas;
- Têxtil;
- Papel e celulose;
- Cerâmica e Vidro.

Esses segmentos foram selecionados após a uma ampla verificação de subdivisões encontradas nas diversas fontes, a saber: Metodologia de benchmarking energético para



indústrias; Atlas da eficiência energética 2021; Balanço Energético 2022; Balanço de Energia Útil 2016 – Projeto META; e Plano Nacional de Eficiência Energética - PDEf 2021. Os segmentos industriais considerados em cada uma destas fontes de informação podem ser vistos na Tabela 2. A ideia aqui é entender quais as indústrias são consideradas nos documentos analisados e mostrar que as classificações são distintas e, às vezes, incomparáveis.

Nota-se que os segmentos selecionados estão em linha com os estudos produzidos para elaboração do Plano Decenal de Eficiência Energética (PDEf) publicado pela Eletrobras em 2021. Aqui neste documento, iremos nos referir a este estudo que foi realizado para posterior elaboração do Plano decenal de Eficiência Energética apenas como PDEf para simplificação. O PDEf teve por objetivo atualizar o Balanço de Energia Útil (BEU) nas questões relacionadas à eficiência energética. Nesse contexto, incorporou propostas de aprofundamento da utilização de conceitos termodinâmicos, apresentou coeficientes de destinação dos energéticos por uso final e determinou parâmetros de eficiência para os usos finais.

Além disso, os dados disponibilizados no PDEf apresentam informações necessárias para a aplicação da metodologia híbrida top-down/bottom-up a partir dos energéticos utilizados e usos finais. Este estudo traz também informações que permitem que uma análise exergética possa ser também realizada.

Por todos estes motivos, justifica-se o uso da abertura dos segmentos industriais proposta no PDEf.



Tabela 2 - Segmentos industriais por estudo

Metodologia de benchmarking energético para indústrias	Atlas da eficiência energética 2021	BEN 2022	BEU 2016 – Projeto META	PDEf 2021
Setor têxtil e de vestuário	Alimentos e bebidas	Cimento	Cadeia do alumínio	Cimento
Setor de alimentos e bebidas	Metalurgia (Siderurgia, ferro-ligas e não ferrosos e outros metalurgia)	Ferro-gusa e aço	Celulose e papel	Ferro gusa e aço
Setor de metalurgia e produtos metálicos	Papel e Celulose	Ferro-ligas	Cadeia siderúrgica	Mineração e pelotização
Setor de transformados plásticos	Química	Mineração e pelotização	Cerâmica	Não-ferrosos e outros da metalurgia
Setor químico e farmacêutico	Cerâmica	Não-ferrosos e outros da metalurgia	Alimentos e bebidas	Química
Setor de cerâmica, vidro e produtos não metálicos	Cimento	Química	Química	Alimentos e bebidas
Setor de papel e celulose	Mineração e pelotização	Alimentos e bebidas		Têxtil
	Outros	Têxtil		Papel e celulose
		Papel e celulose		Cerâmica e Vidro
		Cerâmica		
		Outros		



No presente estudo são consideradas sete diferentes usos finais de energia para cada segmento da indústria modelado, adotando o mesmo praticado em outros documentos de planejamento, como por exemplo no Balanço de Energia Útil – BEU e próprio PDEf. A seguir são apresentados os usos finais considerados neste estudo com uma pequena descrição:

- **Aquecimento direto:** energia usada em fornos, fornalhas, radiação, aquecimento por indução, condução e micro-ondas;
- **Calor de processo,** na forma de vapor gerado: energia usada em caldeiras e aquecedores de água ou circulação de fluídos térmicos;
- **Força motriz:** energia usada em motores estacionários;
- **Refrigeração:** energia usada em geladeiras, freezers, equipamentos de refrigeração e ar-condicionado tanto de ciclo de compressão ou de absorção;
- **Processos eletroquímicos:** energia usada em células eletrolíticas, processos de galvanoplastia, eletroforese e eletrodeposição;
- **Iluminação:** energia utilizada em iluminação de interiores e externa; e
- **Outros usos finais:** energia utilizada em computadores, telecomunicações, máquinas de escritório, xerografia e equipamentos eletrônicos de controle.

Em relação a categoria “Outros” é importante destacar que em termos setoriais, o BEU é mais abrangente, contemplando também, por exemplo, o setor de transporte, residencial etc. No que se refere especificamente a essa categoria para o setor industrial, percebe-se que ela é pouco representativa, pois, além de estarem presentes apenas nos segmentos de Mineração & Pelotização, Não ferrosos; química, e têxtil, possuem também coeficientes de destinação inferiores a 1% além de serem restritos ao energético eletricidade.

Os estudos serão realizados para 18 energéticos, também em linha com o que é considerado nas principais fontes de informação analisadas, inclusive o PDEf. São elas: Gás Natural; Carvão Vapor; Carvão Metalúrgico; Lenha; Produtos da Cana; Outras Fontes Primárias; Óleo Diesel; Óleo Combustível; Gasolina; Gás Liquefeito de Petróleo – GLP; Querosene; Gases de Processo; Coque de Carvão Mineral; Eletricidade; Carvão Vegetal; Álcool Etílico; Outras Fontes Secundárias de Petróleo (O. F. S. Petróleo); e Alcatrão.

Em resumo, foram considerados 18 insumos energéticos (formas de energia final), 7 formas de aplicação (usos finais), em 9 segmentos industriais.

Os dados históricos do parque industrial brasileiro, estratificado por setores, irão ser levantados ao menos nas seguintes fontes de informação: Balanço de Energia Útil - BEU; Balanço Energético Nacional - BEN; agências e órgãos nacionais (ANP, ANEEL, CNI etc.); informações setoriais das indústrias; informações das entidades de classe (associações, por exemplo); agências e órgãos internacionais (IEA, IRENA, parlamento europeu etc.).

Os usos finais podem ser agrupados em usos térmicos e eletromecânicos, distinção relevante sob o ponto de vista das conversões energéticas e suas perdas. Nesse sentido, ainda que eletricidade possa ser utilizada para atender a todos os usos finais, alguns deles são praticamente exclusivos dessa forma final de energia: iluminação, eletroquímica, e outros



usos. A força motriz em grande parte das aplicações estacionárias é fornecida por motores elétricos, contudo nas aplicações móveis, as máquinas térmicas predominam largamente. Assim, como o foco do estudo está no setor industrial, as aplicações estacionárias serão predominantes o que implica em dizer que a força motriz será predominantemente elétrica.

A separação dos usos térmicos em diretos, indiretos e frio é relevante pois os fluxos energéticos nesses casos têm sua qualidade essencialmente definida em função de sua temperatura, em relação ao ambiente. Do ponto de vista da energia consumida e fluxo energético útil resultante, como se verá adiante, a produção de frio é particularmente interessante, podendo resultar de força motriz, geralmente eletricidade, ou aquecimento direto, e sempre resultando efluentes térmicos de baixa temperatura, acima da condição ambiente.

1.3 Principais Referências

O presente trabalho tem como referência primária o Balanço de Energia Útil, BEU, uma ferramenta analítica importante para identificar e avaliar oportunidades de promover incrementos de eficiência energética e redução de perdas de energia. O primeiro BEU foi apresentado em 1983, depois em 1995 (sobre dados do BEN para 1993) e 2005 (sobre dados do BEN para 2004). Mais recentemente a EPE vem reforçando a base de estudos sobre consumo de energia na indústria brasileira, por meio do levantamento de dados de uso final de energia em alguns setores. Mais recentemente, no âmbito do Plano Decenal de Eficiência Energética – PDEf, o BEU contou com uma significativa contribuição, no qual foi levado em consideração a qualidade da energia.

As bases conceituais dessa nova abordagem do BEU do PDEf são dadas pela análise exegética, que combinam as Leis da Conservação e Degradação da Energia. Para facilitar esse processo, para os diversos subsetores industriais e para os diferentes energéticos, são aqui estabelecidas eficiências de referência, em condições médias para a atualidade e prospectivas, considerando a evolução tecnológica.

Tendo em vista o ineditismo do PDEf e a sua essencial importância na quebra do paradigma em se trabalhar com exergia em termos de Balanço de Energia Útil no Brasil, este estudo, como não poderia deixar de ser, adota como principal referência BEU do PDEf que serve, portanto, como ponto de partida para aplicação da metodologia aqui proposta.

Para o melhor entendimento dos resultados apresentados neste trabalho é de crucial importância a definição dos termos a seguir:

- **Energia final** é aquela que está disponível para os consumidores, conforme computado nos balanços de energia convencionais. A energia final processada permite obter formas de energia adequada aos usos finais, como a execução de trabalho, aquecimento, certos processos físico-químicos, refrigeração, ar-condicionado, movimento mecânico e iluminação.



- **Energia utilizável** é a que está disponível para os consumidores após a conversão final (Definição igual à adotada pelo EUROSTAT e pela AIE).
- **Energia útil** é aquela que está disponível após o sistema de uso para a produção de um bem ou serviço, após dedução de todas as perdas de transformação e transporte associadas a ele.

2. Descritivo Setorial

À medida em que as grandes indústrias nacionais enfrentam um ambiente de negócios cada vez mais competitivo, a busca por oportunidades que reduzam o custo de produção, sem afetar negativamente o rendimento e a qualidade do produto, torna-se necessária. A utilização de tecnologias e práticas de eficiência energética vem sendo cada vez mais comuns nos últimos anos para solucionar esse desafio.

O investimento em ações que otimizem o uso da energia apresenta várias vantagens. Por meio do uso racional do recurso energético, obtém-se redução de consumo e, portanto, de custos operacionais. O desenvolvimento de tecnologias mais eficientes aumenta a competitividade industrial, beneficia consumidores e reduz impactos ambientais.

Segundo Canazio (2021)¹, a eficiência energética é, sem dúvida, um dos grandes vetores do desenvolvimento técnico, econômico, ambiental e social do Brasil, auxiliando no uso racional dos recursos naturais, além de promover uma maior segurança energética.

Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo quantificar potencial de desperdício de energia evitado em nove segmentos industriais diferentes, a saber: Cimento; Ferro gusa e aço; Mineração e pelletização; Não-ferrosos e outros da metalurgia; Química; Alimentos e bebidas; Têxtil; Papel e celulose; Cerâmica e Vidro.

2.1 Caracterização Energética Setorial

Historicamente, o Brasil se destaca por ser um país com um alto percentual de fontes renováveis de energia quando comparado ao resto do mundo. Nos últimos 20 anos, a participação das energias renováveis na matriz energética brasileira, manteve-se estável com valores superiores a 40%.

Entre 2011 e 2014, houve uma redução da participação das renováveis na matriz energética devido à queda da oferta hidráulica, associada à menor quantidade de chuvas. A partir de

¹ CANAZIO, A. DETALHE - Reportagens, Procel Info, 2021. Disponível em: <http://www.eletrobras.com/pci/data/Pages/LUMIS8D1AC2E8ITEMID9DF06078983F4E1DACD205D374B25DFFPTBRIE.htm>.



2015, as fontes renováveis retomam uma trajetória de crescimento com a expansão da oferta de derivados da cana, eólica e biodiesel, atingindo 48% em 2020 (EPE, 2022).

De acordo com o Atlas da Eficiência Energética no Brasil (2021) o principal movimento observado no período entre 2000 e 2020 foi o recuo da participação da indústria em contraposição ao avanço dos setores de transporte e energético, conforme apresenta os dados de consumo energético por setor na

Tabela 3.

O setor de transporte chegou a ultrapassar o consumo industrial em 2018 e 2019, no entanto, com a eclosão da pandemia do COVID-19, o consumo para transporte recuou 6,4% e fez o setor industrial retomar patamar entre os setores que mais usam energia no Brasil.

O setor industrial consome, aproximadamente, 32% da energia final consumida no país. Até 2017 era o setor com maior consumo, no entanto, com a redução da atividade industrial entre 2017 e 2019, foi superado pelo setor de transportes (ver

Tabela 3).

Todavia, nos últimos anos dois anos, a demanda energética industrial voltou ao topo dos grandes consumidores, respondendo por um consumo de aproximadamente 85 milhões de tep no ano de 2021.

Em compensação, um aumento de 4,5% na oferta de energia interna foi contabilizado em 2021 em relação ao ano anterior, atingindo 301,5 milhões de tep. A participação de energias renováveis na matriz energética foi marcada pela queda da oferta de energia hidráulica, associada à escassez hídrica e ao acionamento das usinas termelétricas (EPE, 2022).

No caso na energia elétrica, verificou-se um crescimento na oferta interna de 3,9%, chegando a 25,7 TWh em relação a 2020. O principal destaque foi o avanço da geração à base de gás natural sendo responsável por 46,2% do total.

Tabela 3: Consumo energético por setor.

	Consumo final por setor (10 ³ tep)				
	2017	2018	2019	2020	2021
Transportes	82.890	82.189	84.810	79.345	85.144
Agropecuário	12.292	12.348	12.631	13.012	13.110
Energético	26.011	28.620	29.665	28.446	24.861
Público	4.035	4.204	4.268	3.976	3.965
Comercial	8.449	8.506	8.862	7.916	8.614
Residencial	25.420	26.444	26.697	27.600	28.490
Industrial	84.770	80.845	78.699	81.734	84.807
Total	258.914	257.286	259.885	254.592	262.237



Fonte: EPE, 2022.

Apesar do alto consumo energético, o Brasil possui uma matriz elétrica de origem majoritariamente renovável, com ênfase na para a fonte hídrica, responsável por 64,9% da oferta interna. Tendo em conta o consumo final, houve uma evolução de 1,3%, alcançando um total de 545,6 GWh, onde se destacam os setores Industrial e Residencial responsáveis por 35,9% e 26,1% desse montante, respectivamente.

O setor industrial apresentou um acréscimo de 3,0 milhões de tep em valores absoluto e 3,6% de crescimento em relação a 2020. Além disso, alcançou 58% de 'renovabilidade' na matriz energética, representada pela participação dos energéticos apresentados na Figura 1 de acordo com o EPE (2022).

Na referida figura, outras fontes incluem óleo diesel, GLP, querosene, gás de coqueria, alcatrão, gás de refinaria, coque de petróleo, dentre outros renováveis e não renováveis.

De acordo com a Figura 1, a utilização de bagaço de cana sofreu uma redução de 14,8% na indústria devido à queda de aproximadamente 15% da produção de açúcar associada ao setor de alimentos e bebidas, enquanto a utilização de carvão mineral apresentou um crescimento de 11,8% devido ao aumento na produção de aço por redução a coque de carvão mineral.

Além disso, o uso de gás natural cresceu 20,8% em relação ao ano anterior, e o uso de lixívia apresentou um crescimento de 6,2% devido ao aumento em 6,7% da produção de celulose. A utilização de energias renováveis nas indústrias respondeu por 58% do consumo de energia total no ano de 2021.

Figura 1: Participação dos energéticos no setor industrial em 2021.

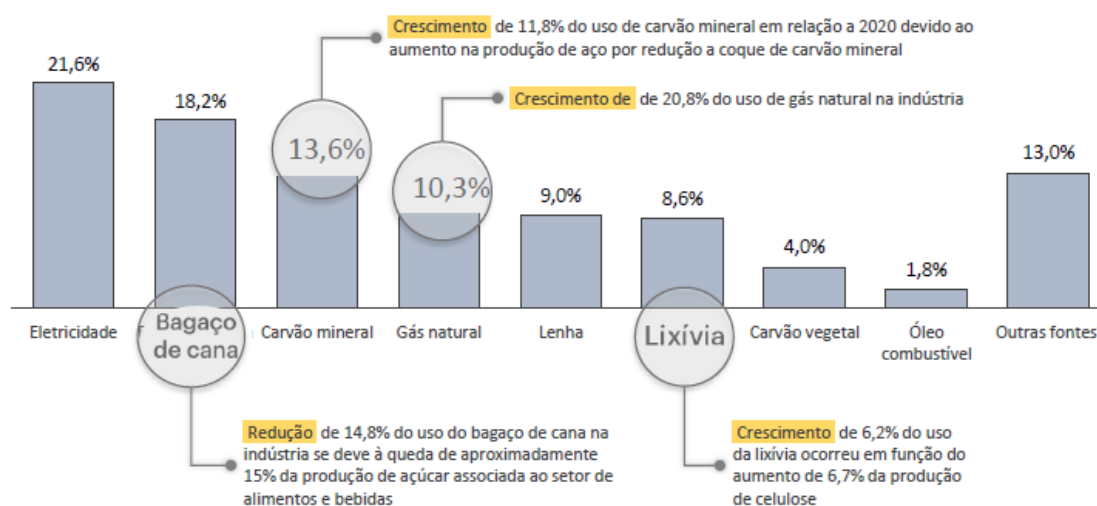


Figura 2: Participação dos energéticos no setor industrial em 2021.

Fonte: EPE, 2022.

Como setor de grande destaque, o consumo de energia na indústria apresentou variações positivas (aumento de consumo) em todos os segmentos avaliados, exceto para o segmento



de Alimentos e Bebidas, o qual apresentou uma queda de 10,5% de consumo comparando-se 2021/2020, conforme expõe a Figura 3.

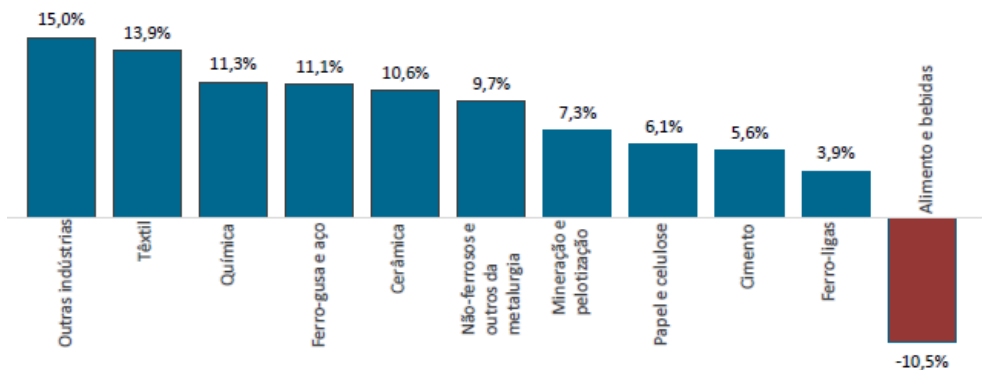


Figura 3: Variação em % do consumo energético por segmento do setor industrial.

Fonte: EPE, 2022.

A Figura 4 apresenta a participação dos segmentos industriais entre 2017 e 2021. Como pode ser observado, o segmento industrial de metalurgia lidera o consumo energético em todo período abordado, o qual inclui siderurgia, ferroligas, não ferrosos e outros da metalurgia.

Além disso, a soma do consumo final de energia em apenas três setores: metalurgia, alimentos e bebidas e, papel e celulose; correspondem a 72% do consumido pela indústria em 2020. Se comparado a 2015, houve um crescimento da participação dos segmentos de alimentos e bebidas, papel e celulose, além de uma redução da participação da metalurgia.

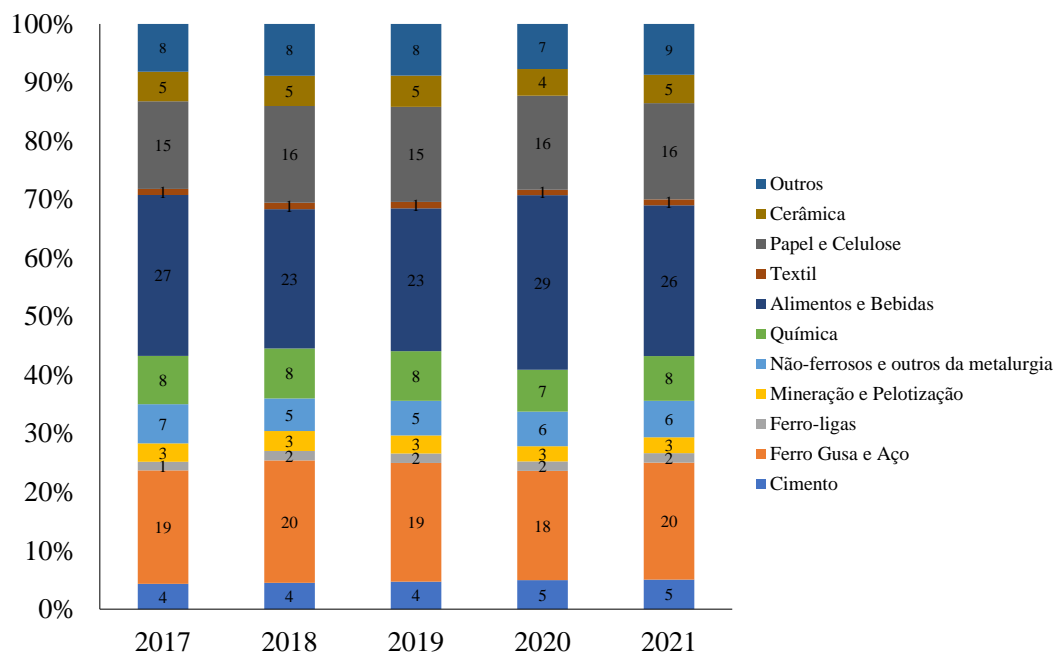


Figura 4: Participação dos segmentos no consumo de energia do setor industrial.



Fonte: BEN, 2022.

2.2 Emissões na indústria

As emissões de gases de efeito estufa no Brasil, em 2020, atingiram um aumento de 9,5%. No ano em que a pandemia da COVID-19 parou a economia mundial e causou uma inédita redução de quase 7% nas emissões globais, o país foi na contramão do resto do mundo (SEEG, 2021).

O total de emissões brutas atingiu 2,16 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente em 2020, contra 1,97 bilhão de toneladas em 2019. O nível de emissões verificado é o maior desde o ano de 2006, conforme expõe a Figura 5.

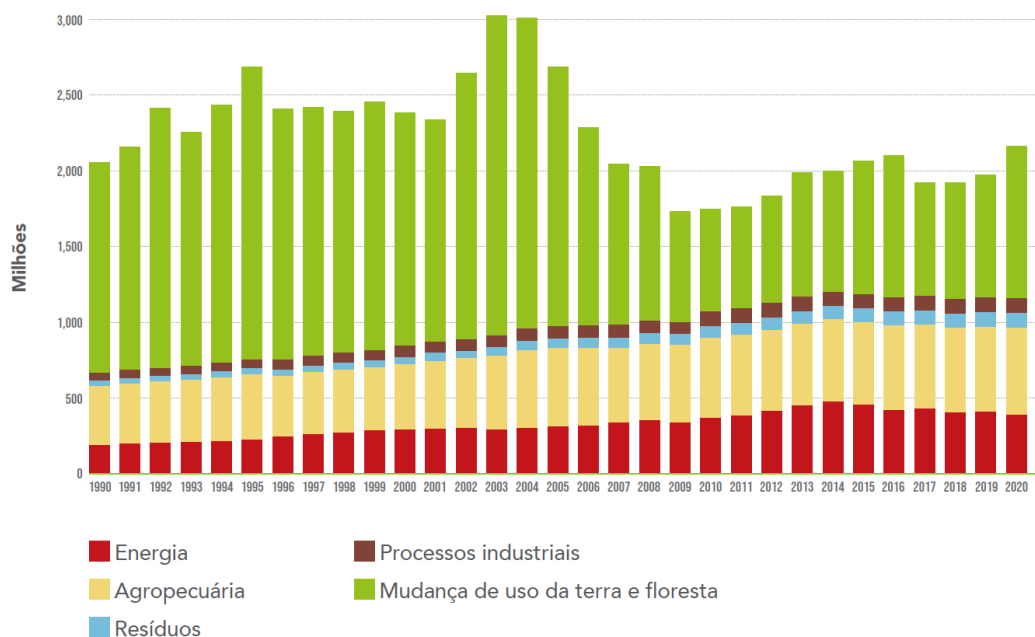


Figura 5: Emissões de gases de efeito estufa do Brasil entre 1990 e 2020.

Fonte: SEEG, 2021.

O fator preponderante para a elevação das emissões foi o desmatamento, em especial na Amazônia e no Cerrado. Os gases de efeito estufa (GEE) lançados na atmosfera pelas mudanças do uso da terra aumentaram 23,6%, sendo compensado pela queda expressiva no setor de energia, que no cenário de pandemia e estagnação econômica apresentou uma queda nas emissões regressando ao patamar de 2011 (SEEG, 2021).

Nas emissões de gases de efeito estufa do setor industrial deve-se considerar não só a participação devido à transformação física ou química na indústria, como também a queima de combustíveis. A queda de emissões relacionadas à energia deve-se a retração de



emissões do setor industrial em 6,9% que vem apresentação redução desde 2015 (SEEG, 2021).

Em 2020, o setor industrial emitiu 100 milhões de toneladas de CO₂. Com relação aos processos industriais, as duas maiores atividades emissoras em processos industriais são a produção de ferro-gusa e aço, que emitiu 38,8 milhões de toneladas de CO₂ em 2020, apresentando uma redução de 5,4% em relação ao ano de 2019, e, a produção de cimento, responsável pela emissão de 22 milhões de toneladas de gases de efeito estufa em 2020, um crescimento de 7,6% em relação ao ano anterior.

Estes números são fruto da redução da produção de aço e recuperação da demanda por cimento desde 2019, após retração entre 2015 e 2018. A Figura 6 apresenta os dados de emissões de CO₂ por segmento industrial nos últimos 20 anos em toneladas de CO₂ equivalente.

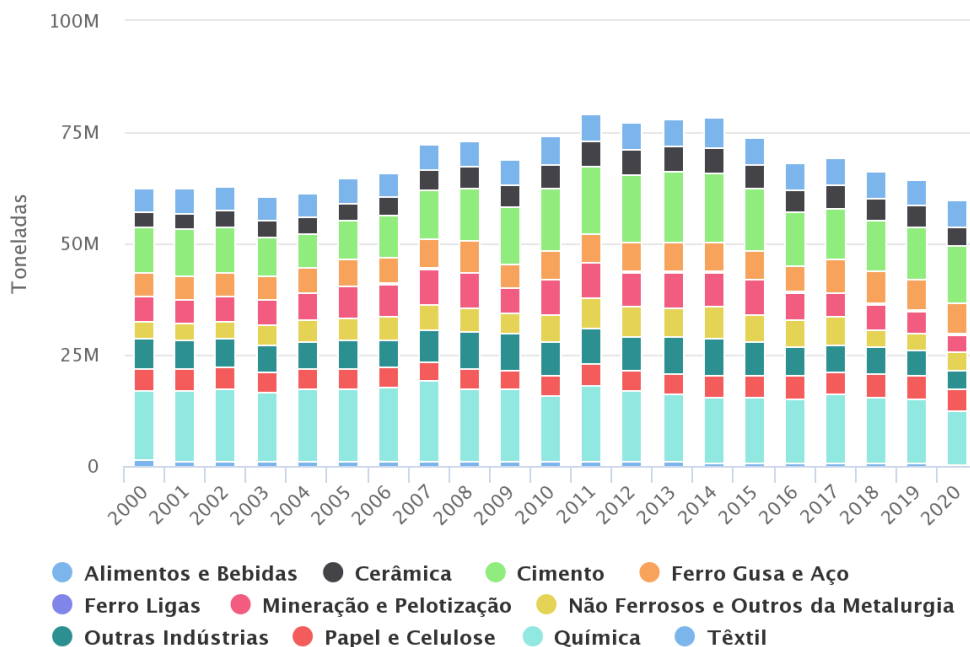


Figura 6: Emissões de gases de efeito estufa nos segmentos industriais.
Fonte: SEEG, 2021.

O panorama de emissões de gases de efeito estufa para os segmentos industriais, objeto de estudo deste relatório, será discutido e detalhado na seção de resultados.



3. Cenários Macroeconômicos

A realização de estudos focados na quantificação dos impactos no consumo de energia do setor industrial, advindos da adoção de medidas de efficientização dos processos produtivos, requer conhecer o nível de atividade industrial.

Considerando que o nível de produtividade industrial está diretamente associado ao comportamento da economia, a questão central consiste em mensurar a evolução da trajetória econômica. Mais especificamente, trata-se do entendimento de como deve ser a trajetória do Produto Interno Bruto (PIB).

No âmbito deste projeto, o conhecimento do nível de atividade econômica é uma condicionante para o processamento dos modelos voltados para a mensuração do potencial de eficiência energética. Em função da natureza do trabalho, em que será utilizada uma abordagem *bottom-up* para estimar o potencial de conservação de energia térmica na indústria, as informações econômicas devem vir com desagregação setorial e em diferentes horizontes temporais.

Qualquer análise prospectiva acerca do nível da atividade industrial passa pelo entendimento das condicionantes econômicas. Logo, é preciso a definição de premissas, não apenas sobre questões estruturais da economia (reformas, ambiente de negócios, produtividade etc.), como também de questões mais conjunturais e imprevisíveis, sobretudo choques externos. Com base nas hipóteses assumidas, é possível a descrição de possíveis trajetórias para a economia e, por consequência, para a atividade industrial.

No exame específico da atividade industrial, é necessária a diferenciação entre os subsetores porque eles apresentam especificidades e podem ser impactados de forma distinta pela dinâmica econômica.

Nestas bases, a partir do enquadramento conceitual apresentado no relatório específico sobre os cenários macroeconômicos, foram construídos cenários para o setor industrial brasileiro. Para isso, dado o reconhecimento que o problema central está na definição das incertezas inerentes ao ritmo de crescimento da economia brasileira, foram construídas narrativas acerca da evolução das condicionantes externas e internas da evolução da economia brasileira, assim como, das especificidades dos diferentes segmentos industriais.

A seguir são apresentados os resultados sumários dos cenários de crescimento prospectado para os diferentes segmentos do setor industrial.

3.1 Abordagem Metodológica

Para a identificação do comportamento da trajetória econômica no horizonte de curto prazo, é possível a realização de predições por meio do uso de métodos estatísticos. Basicamente,



trata-se da construção de modelos econométricos de previsão a partir do processamento de séries históricas de variáveis tidas como relevantes juntamente com a identificação das relações entre essas variáveis e a devida parametrização dos modelos.

Todavia, sempre que existem incertezas de grande magnitude, especialmente no caso em que exista carência de dados, e/ou a presença de variáveis não quantificáveis, a aplicação de ferramentas de previsão deve ser vista com muitas ressalvas. Nestes casos, o aumento do nível de complexidade dos modelos não resulta em melhorias na assertividade preditiva (HUSS, 1988). Este é justamente o caso de análises do comportamento do nível de atividade econômica de médio e longo prazo.

Em contraste com a abordagem preditiva, a construção de cenários por meio dos quais se busca identificar possíveis comportamentos futuros das variáveis dotadas de incerteza mediante enfoques narrativos é uma metodologia bastante utilizada para casos em que as incertezas não são passíveis de serem mensuradas (SCHNAARS, 1987).

De forma resumida, cenários podem ser vistos como o relato em palavras e números sobre caminhos passíveis de serem percorridos por sistemas com variáveis interdependentes e que possuem incerteza. Para que isso seja possível, é necessária uma clara definição do problema, seus limites, além do estágio inicial das suas principais variáveis. Com base nestas informações, devem ser identificadas as variáveis críticas do problema e as condicionantes das possíveis trajetórias destas variáveis e, desta forma, desenhadas possíveis “imagens” do futuro (SWART et al.,2004).

Observa-se, assim, que a definição precisa de premissas dos cenários é fundamental para que os cenários construídos sejam consistentes (SCHNAARS, 1987). Concomitantemente, é preciso distinguir entre os determinantes da trajetória futura que são realmente dotados de incerteza daqueles que podem ser tidos como pré-determinados ou constantes. Enquanto os fatores dotados de incerteza são imprevisíveis e não podem ser modelados, os fatores pré-determinados apresentam mudanças previsíveis as quais podem ser atribuídas probabilidades. Já as demais variáveis, na medida que possuem caráter estrutural e não sofrem alterações com o decorrer do tempo, podem ser assumidas como constantes (POSTMA e LIEBL, 2005).

Portanto, a título de conclusão, é possível afirmar que a metodologia de cenários se baseia na premissa que o futuro não é função de manipulação matemática do passado e sim o resultado da conjugação de forças passadas, presentes e futuras. Logo, seu enfoque é de natureza qualitativa e visa compreender de forma contextual o comportamento das variáveis ao longo do tempo e, por consequência, representadas em diferentes cenários. Nestas bases, é notória a importância da adoção de supostos sólidos e coerentes que fundamentem de forma consistente os cenários construídos (SCHNAARS, 1987).



3.2 Revisão de Estudos que Abordam Perspectivas da Economia Brasileira

Com o arrefecimento da pandemia do COVID-19, a expectativa era por um período de forte recuperação da economia mundial. Efetivamente, superados os impactos da variante Omicron, os indicadores econômicos iam todos nesta direção. Todavia, o início da Guerra da Ucrânia, juntamente com todas as sanções econômicas impostas à Rússia, resultou em uma reversão destas expectativas (IMF, 2022).

Em linhas gerais, é possível afirmar que a economia mundial permanece tendo que lidar com choques externos que geram instabilidade na dinâmica econômica e limitam o crescimento da atividade econômica mundial. Neste contexto, as implicações de natureza social, sobretudo nos países de menor nível de renda, tendem a ser bastante relevantes (WORLD BANK, 2022).

A questão central é que os efeitos da guerra não ficam restritos aos países envolvidos. Por si só, o conflito bélico impacta a atividade econômica mundial na medida em que resulta em contrações de grandes dimensões nas economias da Ucrânia e da Rússia. Todavia, é preciso considerar os impactos da guerra nos mercados de *commodities*, no comércio internacional e nos fluxos de capital. Tais impactos acabam por globalizar os efeitos da guerra. Compreende, assim, a grande deterioração do cenário econômico mundial e de suas perspectivas (IMF, 2022).

Basicamente, os efeitos da guerra se fazem presentes através da quebra de cadeias produtivas e elevação nos preços de *commodities*. Em especial, ressalta-se o aumento de preços e da volatilidade nos mercados de energia com severas consequências para países dependentes de importação de grandes montantes de energia. Neste contexto, são inevitáveis as pressões inflacionárias, a deterioração da situação fiscal de muitos países e o aumento da vulnerabilidade financeira do sistema econômico mundial. Ademais, já é possível constatar o crescimento da pobreza e dos níveis de insegurança alimentar (WORLD BANK, 2022).

A tendência de alta de preços faz com que bancos centrais tenham que adotar políticas monetárias contracionistas. Esta é uma situação especialmente crítica para países em vias de desenvolvimento, os quais em muitos casos ainda precisam se deparar com situações fiscais frágeis (IMF, 2022). A necessidade de elevação da taxa de juros em um contexto de baixo crescimento econômico traz consigo o risco de estagflação para a economia mundial semelhante à vivenciada na década de 1970. Esta é uma grande ameaça que será preciso lidar nos próximos anos (WORLD BANK, 2022).

Nestas bases, contrastando com o crescimento de 6,1% da economia mundial em 2021, IMF (2022) projeta um crescimento de 3,6% para a economia mundial em 2022 e em 2023. No médio prazo, mesmo reconhecendo as incertezas existentes, sobretudo no que tange à extensão e duração da Guerra da Ucrânia, o estudo do IMF estima um crescimento médio anual de 3,3% para a economia mundial.



Já o Banco Mundial (2022) estima o crescimento econômico mundial de 2022 em 2,9%, sendo de 3% o crescimento projetado para os anos de 2023 e de 2024. Este crescimento seria impulsionado pelas economias em vias de desenvolvimento que devem crescer 3,4% em 2022 e a taxas superiores a 4% em 2023 e em 2024. Entretanto, o estudo faz ressalvas quanto aos riscos existentes relativos a tensões geopolíticas, implicações do estagflação, instabilidade financeira e restrições nas cadeias de insumos.

No caso específico do Brasil, após o crescimento de 4,6% em 2021, IMF (2022) estimava em abril deste ano um crescimento de 0,8% para 2022 e de 1,4% em 2023. Segundo o estudo, a limitada integração da América Latina nos principais fluxos de comércio internacional, especialmente com a Europa, e o aperto monetário como forma de controlar a inflação irão impactar o crescimento da economia brasileira. Em um horizonte de tempo um pouco maior, IMF (2022) projeta um crescimento de 2% para a economia brasileira em 2027. Notadamente, trata-se de taxas de crescimento modestas.

Por sua vez, o Banco Mundial WORLD BANK (2022) estimava em junho um crescimento de 1,5% para economia brasileira em 2022 com desaceleração para 0,8% em 2023 e uma breve retomada em 2024 quando o crescimento seria da ordem de 2%. Estas projeções são influenciadas pelo entendimento que a espiral inflacionária juntamente e a tendência de elevação das taxas de juros contribuem para a conformação de um ambiente com viés recessivo.

Já o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Aplicada (IPEA) realiza uma análise mais minuciosa acerca das perspectivas de curto prazo da economia brasileira (IPEA, 2022). Segundo este estudo, o crescimento projetado para atividade econômica brasileira em 2022 é de 2,8% em contraste com a projeção anterior do próprio IPEA de 1,8%. Para o ano de 2023, estima-se uma taxa de crescimento de 1,6%. Apesar de ressaltar a deterioração da situação econômica mundial, o crescimento da economia brasileira nos dois primeiros trimestres deste ano superou as expectativas e isso resultou na revisão das projeções.

Além do efeito positivo do aumento dos preços das commodities para os setores exportadores brasileiros, o estudo do IPEA discute se a taxa normal de crescimento da economia brasileira não estaria subestimada nos modelos de projeções econômicos comumente utilizados. O suposto é que em anos recentes foram tomadas medidas e realizadas reformas (teto de gastos, reformas da previdência e trabalhista, mudança na metodologia de cálculo da taxa de juros de longo prazo, novos marcos do saneamento e do gás natural, etc.) criaram um ambiente de negócios mais favorável ao investimento privado e promotor de ganhos de produtividade.

Ao se fazer a análise com desagregação setorial, IPEA (2022) pontua que o crescimento da economia brasileira em 2022 será liderado pelo setor de serviços que deverá crescer 3,9% com efeitos positivos na demanda doméstica. Por sua vez, o crescimento do setor industrial brasileiro em 2022 deverá ser de 1,7%. Apenas o setor agropecuário deverá apresentar retração, a qual é estimada em torno de 1,7%.



Em contrapartida, para o ano de 2023, o estudo do IPEA aponta que o crescimento de 10,9% do setor agropecuário irá impulsionar o crescimento econômico com a indústria e o setor de serviços apresentando crescimentos modestos de, respectivamente, 0,8% e 0,7%. Entretanto, conforme enfatizado na seção anterior, ao se realizar análises em um horizonte temporal maior, torna-se inevitável a adoção da metodologia de cenários. Neste sentido, o PDE elaborado anualmente pela EPE pode ser tido como uma importante referência para o exame do nível de atividade econômica prospectado para o início da década de 2030.

Partindo-se da premissa que o ritmo da atividade econômica mundial deverá ser moderado ao longo dos próximos dez anos, especialmente nos países desenvolvidos por razões estruturais, em um contexto de menor crescimento da economia chinesa e aumento da importância relativa de outras economias emergentes, EPE (2021) apresenta três cenários para a economia brasileira. A Tabela 4 a seguir sintetiza as bases destes cenários.

Tabela 4 - Premissas dos Cenários Econômicos do PDE 2031

Pontos Críticos	Cenário Inferior	Cenário Referência	Cenário Superior
Evolução da Pandemia	Novas ondas da doença resultam em uma duração mais longa da pandemia no país	Ritmo de vacinação permite imunizar grande parcela da população em 2021, com redução gradual do número de casos e ausência de novas ondas ²	Aceleração da vacinação permite a redução acentuada do número de casos e ausência de novas ondas
Confiança e Ritmo da Recuperação	Cenário de elevada incerteza interrompe recuperação da economia, que fica estagnada no curto prazo	Cenário com menor incerteza relacionada à pandemia permite um aumento da confiança e um processo de recuperação sustentado	Cenário mais favorável permite um aumento acentuado da confiança e um processo de recuperação acelerado
Aprovação de Reformas e Ambiente de Negócios	Dificuldade na aprovação de reformas	Aprovação de reformas importantes ao longo do horizonte	Aprovação de reformas importantes já no curto prazo
Produtividade Total dos Fatores (PTF)	Fraco crescimento	Crescimento gradual	Forte crescimento
Contas Públicas	Dificuldade de realização de ajustes fiscal	Ajuste fiscal com gradual redução da relação entre dívida líquida do setor público e o PIB	Ajuste fiscal com significativa redução da relação entre dívida líquida do setor público e o PIB

Fonte: EPE (2021).

Em linhas com a hipótese de IPEA (2022) acerca dos avanços das diretrizes legais da economia brasileira, EPE (2021) considera que o PIB no horizonte decenal será impulsionado

² Embora a evolução da pandemia do COVID-19 continue sendo uma variável de risco para o ritmo da atividade econômica, é preciso ressaltar que existiram expressivos avanços na campanha de vacinação nos anos de 2021 e de 2022. Logo, é possível afirmar que o COVID-19 pode ser tido hoje como uma variável de menos risco para a economia quando comparado com o momento da elaboração do PDE 2031.



por melhorias no ambiente de negócios que incitarão a realização de investimentos³. Dentre os investimentos a serem realizados, é enfatizado a importância daqueles inerentes ao setor de infraestrutura, vide os impactos que eles possuem em termos de resolução de gargalos e aumento da produtividade⁴. Ademais, trabalha-se com a hipótese de redução do déficit público e, por consequência, de uma melhor situação fiscal do país. Neste contexto, em seu cenário de referência, o PDE 2031 projeta um crescimento anual médio de 2,8% para a economia brasileira até 2026 e de 3% para o período compreendido entre os anos de 2026 e 2031 (EPE, 2021).

Embora aponte para crescimentos nos setores agropecuário e de serviços, EPE (2021) estima que o setor industrial será aquele de maior crescimento no período decenal. A Figura 6 seguir ilustra as previsões com desagregação setorial realizadas no PDE 2031.

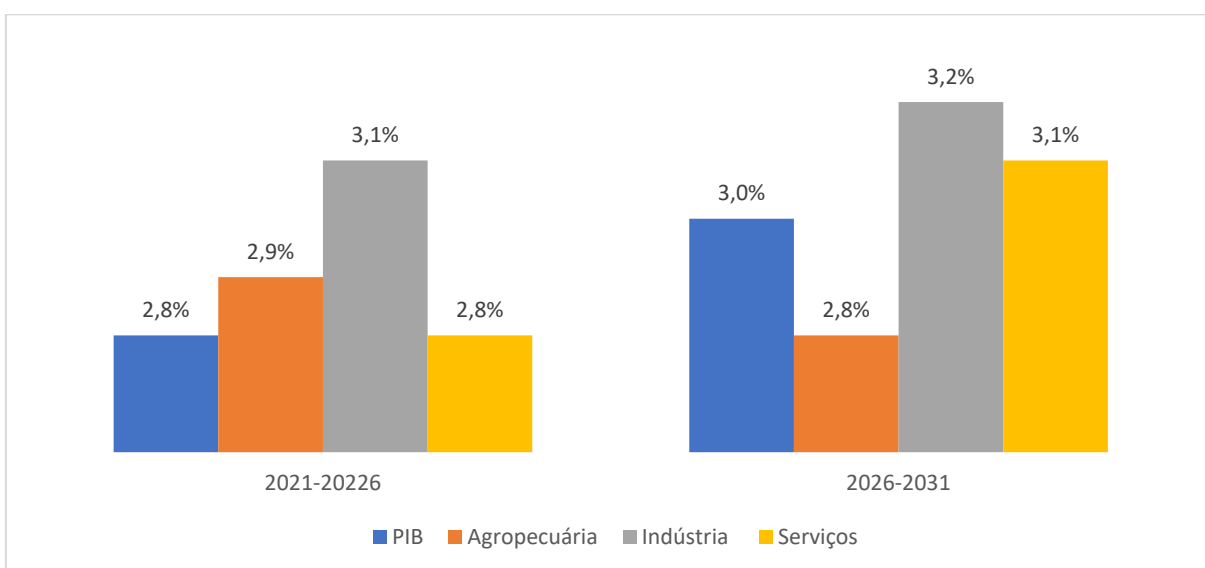


Figura 7 - Evolução do PIB com Desagregação Setorial no PDE 2031 - Fonte: EPE (2021)

Ao se desagregar o crescimento do setor industrial entre seus diferentes segmentos, algumas ponderações precisam ser feitas. Inicialmente, é preciso destacar a grande importância da indústria extrativa devido ao aumento da demanda por minério de ferro e da produção de petróleo. Concomitantemente, a perspectiva de aquecimento da demanda interna juntamente com investimentos em infraestrutura irá impulsionar os segmentos de construção e da indústria de transformação. Dentro da indústria de transformação, o segmento energointensivo requer tratamento separado. Basicamente, este segmento é composto pelas indústrias de papel e celulose, siderúrgica, alumínio e alumina, cerâmica e vidro, alimentos e

³ Estima-se que os investimentos responderão por 20% do PIB no período entre 2026 e 2031. Para efeito de dimensionamento, os investimentos responderam por apenas 15,9% do PIB entre 2016 e 2021.

⁴ No que tange à produtividade da economia brasileira, EPE (2021) estima ganhos de 0,5% no quinquênio 2021-2026 e da ordem de 0,7% nos anos subsequentes. Ao se constatar que houve retração anual média 2,3% da produtividade da economia brasileira entre 2011 e 2016 e no quinquênio seguinte a produtividade ficou estagnada, verifica-se a relevância dos ganhos de produtividade prospectados.



bebidas, soda-cloro e petroquímica. A Figura 8 ilustra a evolução histórica dos segmentos da indústria brasileira e, sobretudo, suas perspectivas até 2031.

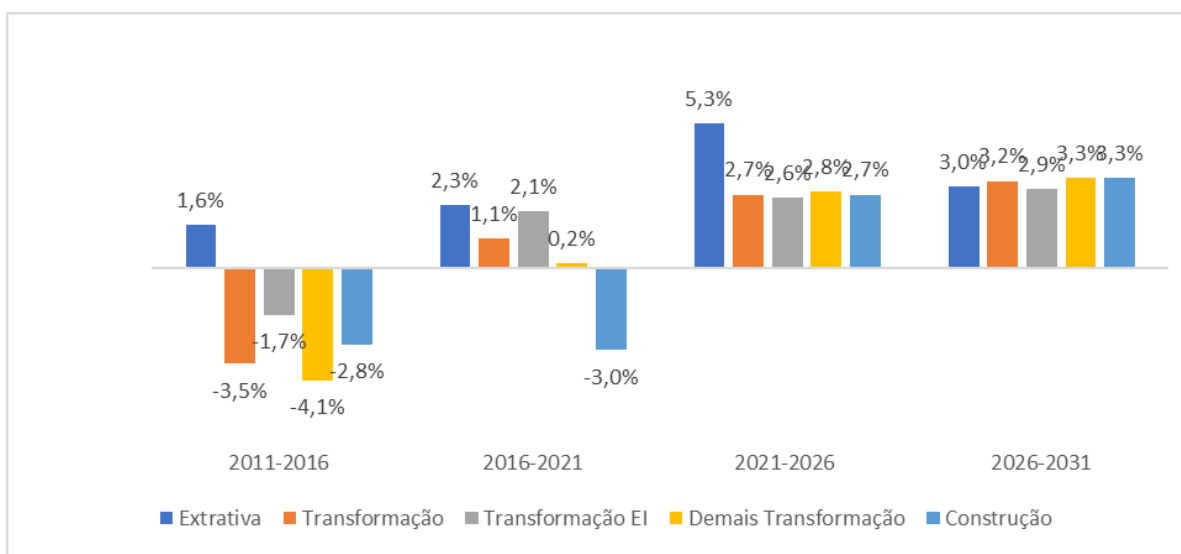


Figura 8 - Desagregação da Crescimento da Atividade Industrial Fonte: EPE (2021).

Ao se comparar os resultados do cenário de referência apresentado no PDE 2031 para o período 2021-2031 com os outros cenários, nota-se consideráveis variações nas taxas de crescimento projetadas para o PIB e para o nível de atividade econômica do setor industrial. A Figura 9 sintetiza os dados do crescimento da economia brasileira entre 2021-2031 estimados por EPE (2021) com desagregação setorial.

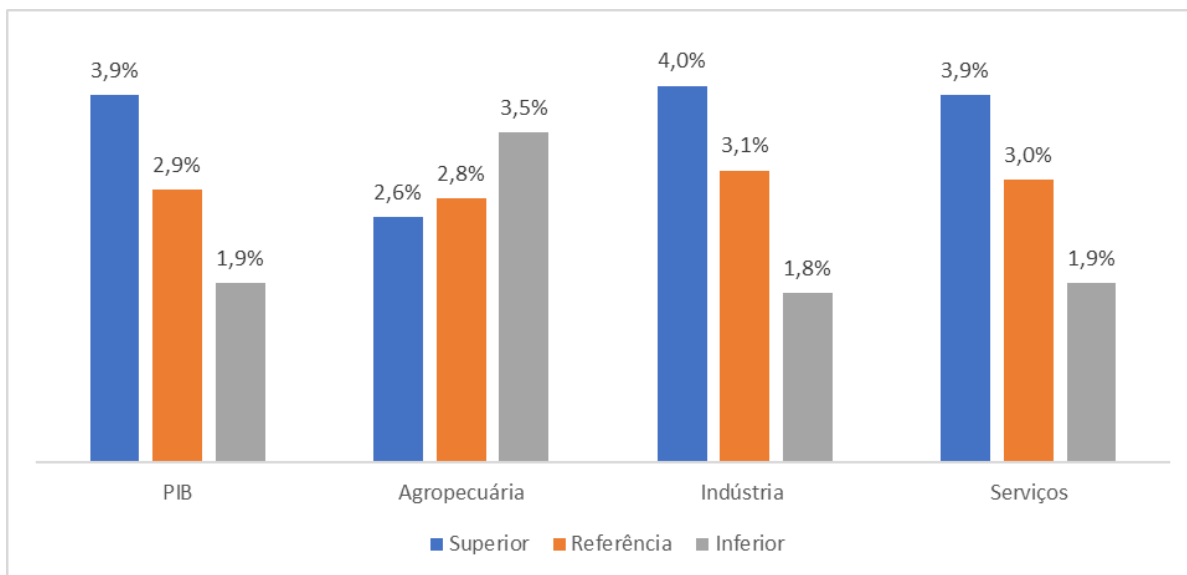


Figura 9 - Crescimento da Economia Brasileira estimado pelo PDE 2031 com Abertura Setorial Fonte: EPE (2021).

No que tange às perspectivas da economia brasileira no horizonte temporal de 2050, as análises são notadamente mais complexas em função do elevado nível de incertezas



existentes. A leitura crítica de PWC (2017) é bastante ilustrativa no sentido de permitir ao leitor o dimensionamento desta problemática.

Basicamente, este estudo faz previsões para a economia mundial em 2050. Dentre suas projeções, consta que a economia mundial iria dobrar de tamanho até 2050 em um contexto de retirada de políticas protecionistas e ausência de grandes catástrofes. Em grande medida, esta expansão ocorreria liderada pelas economias emergentes após os países em vias de desenvolvimento realizarem reformas estruturais que dariam maior estabilidade macroeconômica melhorando e melhorariam o ambiente de negócios. Nestas bases, não apenas a China se consolidaria como a maior economia do mundo, como o Brasil se tornaria a quinta economia do mundo e a economia do México se tornaria maior que a economia da Alemanha.

Apesar das projeções realizadas por PWC (2017) serem bem fundamentadas, estas previsões precisam ser relativizadas após o mundo ter vivenciado a pandemia da COVID-19 e a escalada da tensão geopolítica com a Guerra da Ucrânia com suas implicações macroeconômicas. Notadamente, trata-se de choques externos que tendem a não serem antecipados por modelos de natureza preditiva.

Reitera-se, assim, a necessidade de, não apenas fundamentar projeções em premissas consistentes, como também da ciência que cenários são narrativas de possíveis comportamentos futuros de trajetórias dotadas de incerteza. Nesta direção, cabe mencionar as projeções para a economia brasileira em 2050 presentes no PNE 2050 elaborado pela EPE.

Grosso modo, o estudo de longo prazo da EPE constrói dois cenários para a economia brasileira que se diferenciam em função da realização de reformas e da evolução dos investimentos, da produtividade e das contas públicas. A Tabela 5 sintetiza como estas variáveis são retratadas nos cenários apresentados no PNE 2050.

Tabela 5 - Diretrizes para os Cenário de Longo Prazo da Economia Brasileira do PNE 2050 Fonte: EPE (2018).

Pontos Críticos	Cenário Inferior	Cenário Superior
Reformas	Reformas paliativas que não provocam mudanças estruturais importantes	Reformas estruturais significativas
Investimentos	Os investimentos não alcançam taxas altas em virtude da instabilidade da economia	Melhor ambiente de negócios e maior estabilidade econômica permitem maiores investimentos, com destaque para infraestrutura
Produtividade Total dos Fatores (PTF)	Ganhos limitados de produtividade	Fortes ganhos de produtividade
Contas Públicas	Dificuldade de realizar superávits primários significativos fazem com que a relação entre a dívida líquida do setor público e o PIB seja crescente	Superávits primários significativos e trajetória de juros mais favorável permitem uma redução na relação entre a dívida líquida do setor público e o PIB



A partir destas premissas, foram projetadas taxas médias de crescimento para economia brasileira. As Figura 10 e 11 apresentam os resultados apresentados, respectivamente, para os cenários inferior e superior com desagregação setorial e diferentes aberturas temporais

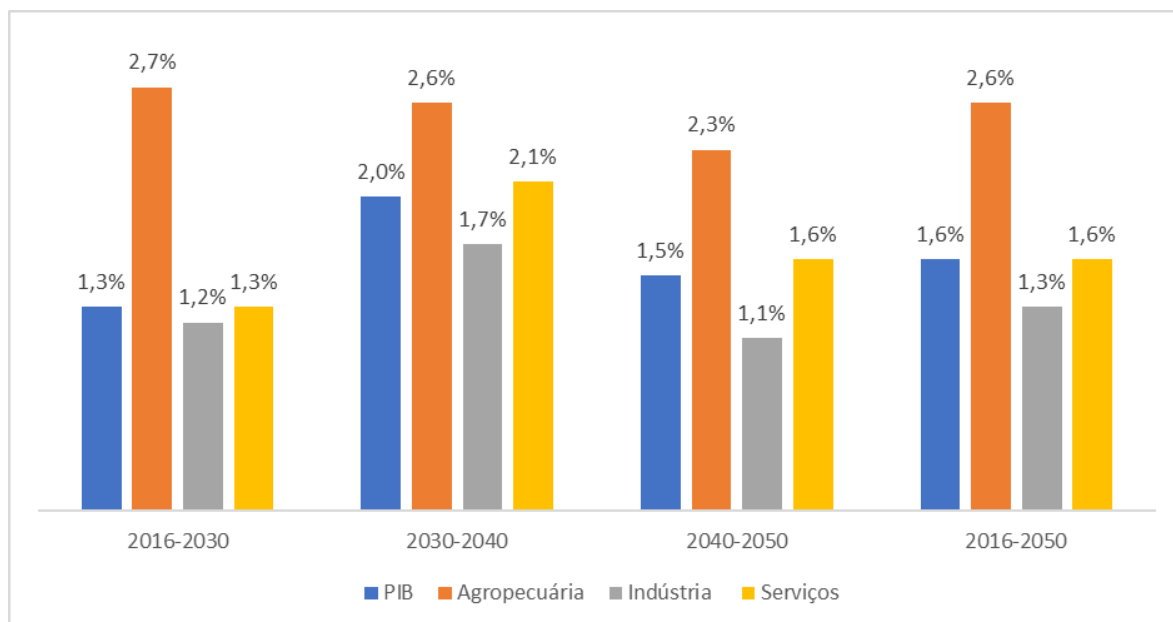


Figura 10 - Evolução do PIB com Desagregação Setorial no Cenário Inferior do PNE 2050 Fonte: EPE (2018).

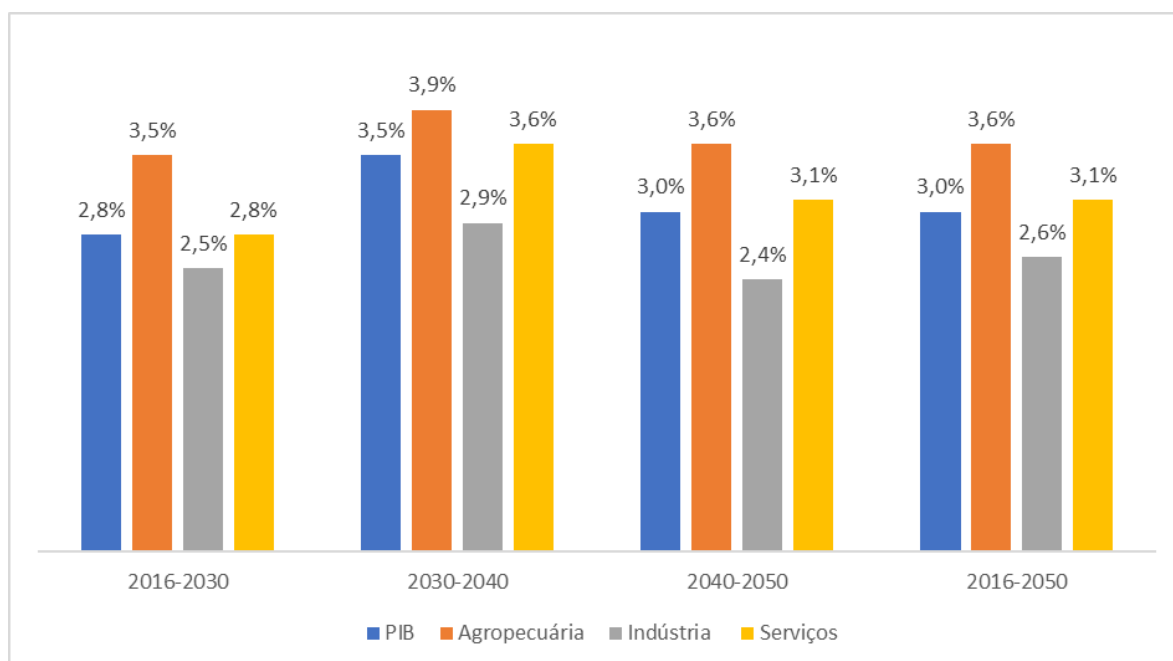


Figura 11 - Evolução do PIB com Desagregação Setorial no Cenário Superior do PNE 2050 Fonte: EPE (2018).



Em contraste com as projeções econômicas brasileiras caracterizadas pelo maior crescimento do setor industrial apresentadas no PDE 2031, o PNE 2050 aponta o setor agropecuário como o principal impulsionador do crescimento da economia brasileira. Mesmo o setor de serviços apresentaria um crescimento ao setor industrial. Todavia, dado a premissa que o cenário superior teria um melhor ambiente de negócios e avanços tecnológicos, o setor industrial apresentaria um crescimento anual médio mais próximo do crescimento projetado para a economia brasileira como um todo.

3.3 Cenários para Indústria Brasileira

Conforme pode ser atestado pela seção anterior deste relatório, qualquer análise prospectiva acerca do nível da atividade industrial passa pelo entendimento das condicionantes econômicas. Logo, é preciso a definição de premissas, não apenas sobre questões estruturais da economia (reformas, ambiente de negócios, produtividade etc.), como também de questões mais conjunturais e imprevisíveis, sobretudo choques externos. Com base nas hipóteses assumidas, é possível a descrição de possíveis trajetórias para a economia e, por consequência, para a atividade industrial.

No exame específico da atividade industrial, é necessária a diferenciação entre os subsetores porque eles apresentam especificidades e podem ser impactados de forma distinta pela dinâmica econômica. Por exemplo, a dinâmica da economia internacional tende a impactar mais setores exportadores.

Nestas bases, a partir do enquadramento conceitual apresentado no início deste relatório, foram construídos cenários para o setor industrial brasileiro. Para isso, dado o reconhecimento que o problema central está na definição das incertezas inerentes ao ritmo de crescimento da economia brasileira, foram construídas narrativas acerca da evolução das condicionantes externas e internas da evolução da economia brasileira, assim como, das especificidades dos diferentes segmentos industriais.

O objetivo desta seção é justamente o de apresentar a descrição dos três cenários construídos para a indústria brasileira juntamente com os respectivos dados de crescimento prospectado para os diferentes segmentos do setor industrial.

3.4 Cenário de Referência

Na segunda metade da década de 2020, a tensão geopolítica mundial arrefece e nas décadas seguintes esta tensão se resume a uma espécie de guerra fria sem a ocorrência de novos conflitos armados. Em paralelo, uma maior vigilância no que tange aos riscos sanitários impede que novas pandemias ocorram até 2050.

Entretanto, a economia mundial ainda precisará lidar com os impactos da pandemia da COVID-19 e da Guerra da Ucrânia. Até o fim da década de 2020, a situação de estagflação



irá permanecer. Já nas décadas de 2030 e de 2040, a atividade econômica mundial voltará a crescer e a espiral inflacionária será contida.

Apesar da retomada do crescimento econômico mundial, os fluxos comerciais internacionais serão mais modestos em função de uma escalada de práticas nacionalistas em detrimento à visão globalizada do mundo. Além de prejudicar a dinâmica de setores exportadores, as restrições ao comércio internacional acabam por limitar o próprio crescimento econômico.

No âmbito brasileiro, a melhoria do ambiente de negócios juntamente com a redução do déficit público possibilita uma retomada gradativa do crescimento econômico até o fim da década de 2020. Porém, os efeitos das reformas estruturais em termos de atração de investimentos privados e da melhor situação fiscal do país apenas se fazem efetivamente presentes nas décadas de 2030 e de 2040. Estas décadas também terão o crescimento econômico impulsionado pelos ganhos de produtividade dos fatores de produção, sobretudo aqueles derivados de uma melhor qualificação da mão de obra e de uma melhor infraestrutura.

Ao se examinar as perspectivas econômicas de cada um dos segmentos da indústria brasileira, verifica-se que a indústria extrativa é bastante impactada pelo estagflação da economia mundial na medida em que a recessão mundial arrefece o interesse por minério de ferro. Logo, o crescimento anual médio deste setor até 2030 é de 2%. Nas décadas seguintes, beneficiado pela melhoria do cenário externo e por obras de infraestrutura com efeito em cascata por toda a economia, o crescimento anual médio da indústria extrativa passa a ser de 2,5%.

Em termos da indústria de transformação, o crescimento da mesma, sobretudo até 2030, é liderado pela demanda interna em função da recessão em nível mundial. Nestas bases, o setor de transformação como um todo apresenta uma taxa média de crescimento de 1,5% até 2030 e de 1,8% nas duas décadas seguintes.

Dentre os subsetores da indústria de transformação, os segmentos energointensivos serão impulsionados pela retomada de obras de infraestrutura em um contexto de mercado internacional restrito. Logo, o crescimento anual médio deste subsetor seria de 1,4% até 2030. Nas duas décadas seguintes, a retomada gradativa do crescimento da economia mundial elevaria a taxa média de crescimento anual para 1,6%.

No que tange aos demais segmentos da indústria de transformação, além do mercado interno permanecer como principal destino para seus produtos, até o fim da década de 2020 existirão episódios de restrições na cadeia de suprimentos. Como consequência, entre 2023 e 2030, o crescimento anual médio deste segmento será de 1,6%. Já, nas duas décadas seguintes, a normalização da cadeia de suprimentos juntamente com a melhoria da economia mundial cria condições para que este subsetor cresça a uma taxa anual média de 2%.

Já o setor de construções volta a crescer na medida em que existe uma retomada da economia brasileira. Para o período compreendido entre 2023 e 2030, seu segmento anual médio é de 1,5%. Nas décadas de 2030 e de 2040 este crescimento passa a ser de 2% em função da gradativa retomada de obras de infraestrutura.



A Tabela 6 a seguir sintetiza as projeções de crescimento para os segmentos da indústria brasileira ao longo das próximas décadas no cenário “referência”.

Tabela 6 - Taxas de Crescimento Anual Médio (%) para Setores da Indústria Brasileira no Cenário “referência”

Setores	2023-2030	2030-2050
Extrativa	2	2,5
Transformação	1,5	1,8
Transformação Energointensiva	1,4	1,6
Outras Transformação	1,6	2
Construção	1,5	2

Quando comparados com os dados apresentados da seção “Revisão de Estudos que Abordam as Perspectivas da Economia Brasileira”, estas taxas de crescimento seriam compatíveis com a taxa de crescimento anual médio do setor industrial brasileiro apresentada pelo PDE 2031 em seu cenário inferior.

3.5 Cenário Superior

O fim da Guerra da Ucrânia marca o início de uma nova era na geopolítica mundial. Já no início da segunda metade da década de 2020, é estabelecida uma convenção internacional reforçando mecanismos multilaterais e a busca pela cooperação entre os países.

Neste contexto, a visão globalista reassume importância e a necessidade de combater as mudanças climáticas se torna a principal pauta da agenda política mundial na década de 2030 após novo relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) apontar para um elevado risco de catástrofes nas próximas décadas.

Em paralelo, muitos esforços são feitos no âmbito de investimentos em saúde pública, sobretudo em iniciativas voltadas para impedir a ocorrência de novas pandemias. Este esforço é feito dentro de uma lógica em que a questão social e o combate à pobreza são tidos como temas prioritários na busca pela promoção do desenvolvimento sustentável da economia mundial.

Todas estas iniciativas resultam em um aumento da confiança dos agentes na economia. Ainda na década de 2020, o relaxamento da tensão geopolítica mundial e, suas implicações em termos de normalização das cadeias de suprimento e redução dos níveis de preços e volatilidade nos mercados de energia, possibilita que políticas monetárias contracionistas apresentem resultados em um curto espaço de tempo. Como consequência, a perspectiva de um longo período de estagflação não se confirma.

Nas décadas seguintes, a busca pela descarbonização da economia através da promoção de uma economia verde atua no sentido de impulsionar o crescimento econômico. Isso ocorre em um contexto de crescentes investimentos em atividades de pesquisa e desenvolvimento e implantação de inovações em diferentes áreas do conhecimento.



Ademais, a dinâmica de crescimento econômico resulta em melhorias nas condições fiscais da maior parte dos países. Como consequência, passa a existir espaços para eventuais políticas anticíclicas capazes de manter o crescimento econômico sustentado e momentos de arrefecimento da atividade econômica.

Toda esta conjuntura positiva em nível internacional acaba se refletindo na economia brasileira. A conjugação de acelerada melhoria da situação fiscal do país com expressivos ganhos de produtividade, sobretudo a partir da década de 2030 como reflexo de investimentos em qualificação humana e de resolução de gargalos de infraestrutura, resulta em elevadas taxas de crescimento da economia.

Sob a ótica da demanda, embora deva ser enfatizado que o mercado interno será o principal responsável pela expansão econômica, deve ser ressaltado que o setor externo também consiste em um importante vetor de demanda para a economia brasileira no período compreendido entre os anos de 2023 e 2050.

Os efeitos sinérgicos entre as retomadas da demanda interna e do comércio internacional podem ser atestados a partir do exame da indústria extrativa. Ao fim da década de 2030, o aquecimento da economia mundial, especialmente das economias emergentes, faz com que o crescimento anual médio deste segmento industrial seja de 3%. Nas duas décadas seguintes, a taxa anual média de crescimento atingiria o patamar de 3,2%.

Além da forte demanda por bens de origem mineral, irá se verificar consideráveis níveis de expansão no setor de óleo e gás. Embora possa soar contraditório em função da descarbonização ser a principal pauta da agenda política mundial, a retomada deste setor ocorre em meio ao reconhecimento da necessidade de garantir segurança energética em bases competitivas de custos. Para isso, existem notáveis avanços e ganhos de competitividade, por exemplo, nas tecnologias de captura e estocagem de carbono de forma a viabilizar o uso de combustíveis fósseis de forma mais limpa.

Ainda mais acentuada será a dinâmica de crescimento da indústria de transformação brasileira impulsionada, não somente pela demanda interna, como também pelo ganho de competitividade dos produtos brasileiros no mercado externo. Entre 2023 e 2030, a taxa anual média de crescimento deste segmento é de 2,2% e nas duas décadas seguintes de 2,4%. No caso dos segmentos da indústria de transformação energointensiva, o duradouro ciclo de investimentos em obras de infraestrutura e habitacionais no Brasil e no exterior irá contribuir bastante para o seu aquecimento, vide os impactos em indústrias como a siderúrgica, por exemplo. Nestas bases, o crescimento anual médio deste subsector é de 2% entre 2023 e 2030 e de 2,2% nas duas décadas seguintes.

É nos demais segmentos da indústria de transformação onde ocorrem os maiores avanços e transformações estruturais da indústria brasileira. Como fruto de qualificação dos recursos humanos e maciços investimentos em Pesquisa e Desenvolvimento, a indústria brasileira consegue ganhar competitividade em nível internacional e alongar suas cadeias produtivas com vistas a agregar mais valor aos seus produtos. Esta tendência é acentuada pela vocação



da economia brasileira ofertar produtos de baixo carbono em bases competitivas. Como consequência, o crescimento anual médio deste subsetor entre 2023 e 2050 é de 2,3% e nas duas décadas seguintes de 2,5%.

Por fim, encontra-se a indústria de construção. Notadamente, este setor será impulsionado, sobretudo a partir da década de 2030, por um amplo programa de obras visando equacionar tradicionais problemas da infraestrutura brasileira e programas habitacionais em larga escala. Apesar da melhoria da situação fiscal abrir espaço para investimentos por parte do estado, em grande medida os investimentos prospectados serão custeados por capital privado. Nestas bases, o crescimento anual médio do setor de construção entre os anos de 2023 e de 2030 é de 2%. Nas duas décadas seguintes, o crescimento médio seria de 2,2%.

A Tabela 7 a seguir sintetiza as projeções de crescimento para os segmentos da indústria brasileira ao longo das próximas décadas no cenário “superior”.

Tabela 7 - Taxas de Crescimento Anual Médio (%) para Setores da Indústria Brasileira no Cenário “superior”

Setores	2023-2030	2030-2050
Extrativa	3	3,2
Transformação	2,2	2,4
Transformação Energointensiva	2	2,2
Outras Transformação	2,3	2,5
Construção	2	2,2

3.6 Cenário Inferior

Além da Guerra da Ucrânia se estender mais do que o previsto, o mundo precisa se deparar com as consequências da invasão russa por um longo período. Em linhas gerais, a elevação da animosidade entre os países resulta na consolidação de discursos nacionalistas refratários a mecanismos multilaterais e à colaboração entre as nações.

Neste contexto, a economia mundial apresenta problemas na cadeia de suprimentos até o fim da década de 2020. A partir de então, apesar da relativa normalização da cadeia de suprimentos, ocorrerão eventos periódicos de falta de suprimentos de cadeias produtivas específicas ao longo das décadas de 2030 e de 2040.

Logo, a economia mundial se depara com um longo período de estagflação. Apenas na segunda metade da década de 2030 que a situação econômica mundial começa a apresentar alguma melhora. Todavia, ainda de forma modesta e com os fluxos de comércio internacional permanecendo limitados. Não bastasse a necessidade da manutenção de juros elevados para lidar com a espiral inflacionária, a situação fiscal frágil dos países impossibilita a adoção de políticas fiscais expansionistas.

Ademais, embora em menor extensão que a pandemia do COVID-19, o mundo passa por novas pandemias nas décadas de 2030 e de 2040. Dado que estes eventos exigem a adoção



de novas medidas restritivas, os mesmos acabam por consistir em choques negativos na atividade econômica mundial.

As dificuldades econômicas mundiais acabam por ter reflexos diretos na economia brasileira. Basicamente, o ajuste fiscal ocorre de forma mais lenta e os ganhos de produtividade ficam comprometidos em um contexto em que o estado não tem capacidade de investir, inexistem avanços tecnológicos capazes de agregar valor para as cadeias produtivas e o ambiente de negócios se deteriora.

Todo este contexto negativo acaba por impactar a demanda por minérios, especialmente minério de ferro, e por combustíveis fósseis. Portanto, em função do cenário recessivo, a indústria extrativa tem um crescimento anual médio de apenas 0,8% até 2030 e de modestos 1,5% ao longo das décadas de 2030 e de 2040.

No que tange à indústria de transformação, a conjugação de economia nacional desaquecida com reduzidos volumes de exportação também acaba por limitar bastante seu desempenho. Em síntese, até o fim da década de 2020 seu crescimento anual médio é de 1% e nas duas décadas seguintes de 1,6%.

Os segmentos energointensivos da indústria de transformação são especialmente afetados pela estagflação da economia mundial em um contexto onde os investimentos em nível nacional também são restritos. Nestas bases, o crescimento anual médio destes segmentos até o final da década 2020 é de 0,8%. Já nas décadas de 2030 e de 2040, o crescimento é de 1,5%.

A situação dos demais subsetores da indústria de transformação é semelhante. Ademais, é preciso ressaltar que permanece e, em alguns casos se agrava, a falta de competitividade dos produtos brasileiros em nível internacional em função da ausência de aprimoramentos técnicos que possibilitem agregar valor e/ou reduzir custos de produção. Logo, o crescimento anual médio dos demais segmentos da indústria de transformação brasileira até o final da década de 2020 é de 1,1% nas duas décadas seguintes de 1,7%.

Por fim, é preciso fazer ponderações acerca do segmento industrial de construção. Em um contexto de incapacidade de o estado realizar investimentos e ambiente de negócios não atrativo, este setor tende a apresentar crescimento limitado. No horizonte temporal até 2030, o crescimento anual médio é de 0,7% enquanto nas duas décadas seguintes seria de 1,2%. A Tabela 8 a seguir sintetiza as projeções de crescimento para os segmentos da indústria brasileira ao longo das próximas décadas no cenário “inferior”.

Tabela 8 -Taxas de Crescimento Anual Médio (%) para Setores da Indústria Brasileira no Cenário “inferior”

Setores	2023-2030	2030-2050
Extrativa	0,8	1,5
Transformação	1	1,6
Transformação Energointensiva	0,8	1,5
Outras Transformação	1,1	1,7
Construção	0,7	1,2



Quando comparados com os dados apresentados da seção “Revisão de Estudos que Abordam as Perspectivas da Economia Brasileira”, estas taxas de crescimento seriam compatíveis com a taxa de crescimento anual médio do setor industrial brasileiro apresentada pelo PNE 2050 em seu cenário inferior.

3.7 Comparação entre Cenários

Considerando que o objetivo principal da construção de cenários deste documento é alimentar estudos que requeiram a prospecção do nível de atividade dos diferentes segmentos da indústria brasileira, a apresentação de forma objetiva dos resultados destes cenários assume relevância na medida que facilita a análise comparativa por parte do analista.

Com este intuito, a Figura 12 apresenta a evolução prospectada⁵ para a indústria extrativa brasileira nos diferentes cenários construídos no horizonte temporal entre 2021 e 2050.

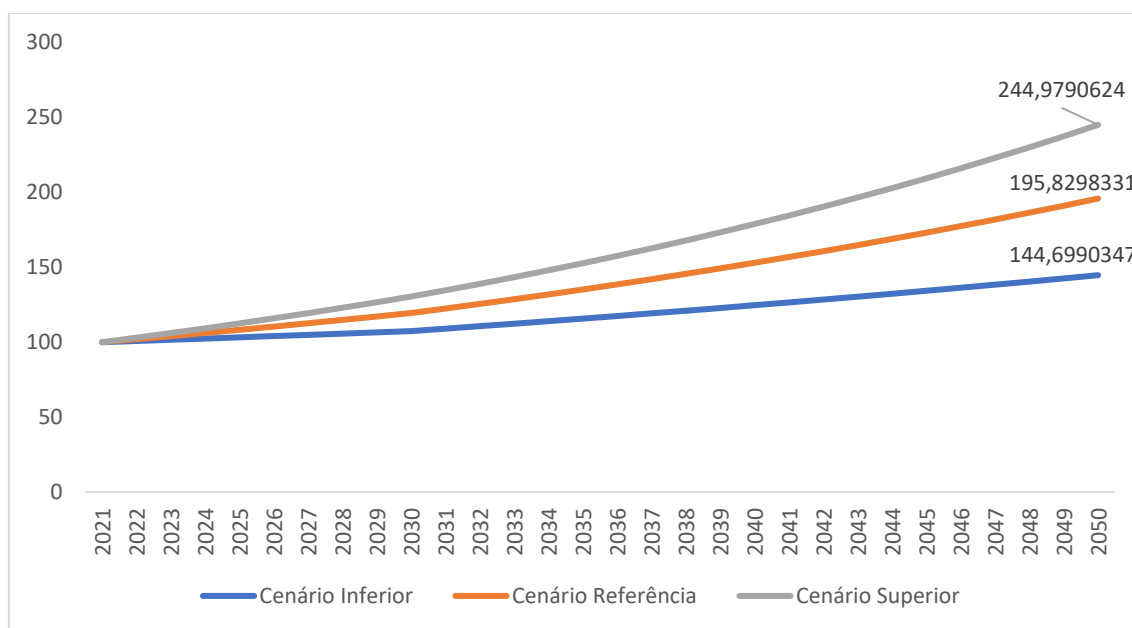


Figura 12 - Evolução Prospectada da Indústria Extrativa Brasileira.

Já no que tange à indústria de transformação, os resultados projetados nos diferentes cenários construídos estão sintetizados na Figura 13 a seguir.

⁵ Evolução tendo como base o valor de referência de 100 no momento inicial. Essa mesma lógica é aplicada aos resultados da evolução prospectada para os demais segmentos industriais.



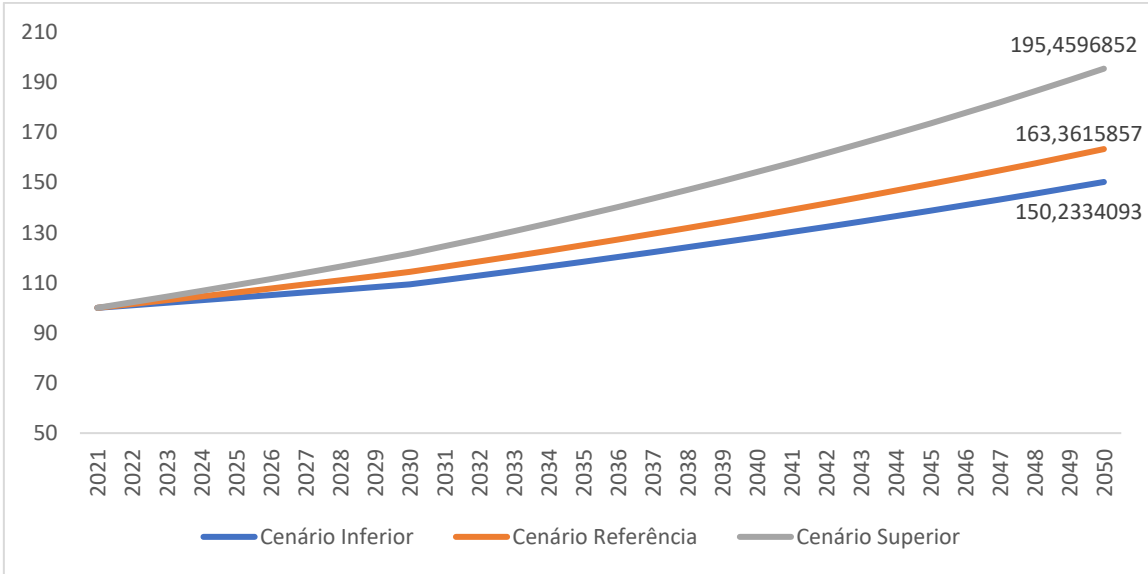


Figura 13 - Evolução Prospectada da Indústria de Transformação Brasileira.

Considerando a estratificação existente dentro da indústria de transformação brasileira, a Figura 14 e a Figura 15 a seguir apresentam as evoluções previstas, respectivamente, para os segmentos energointensivo e para as demais indústrias de transformação nos diferentes cenários construídos.

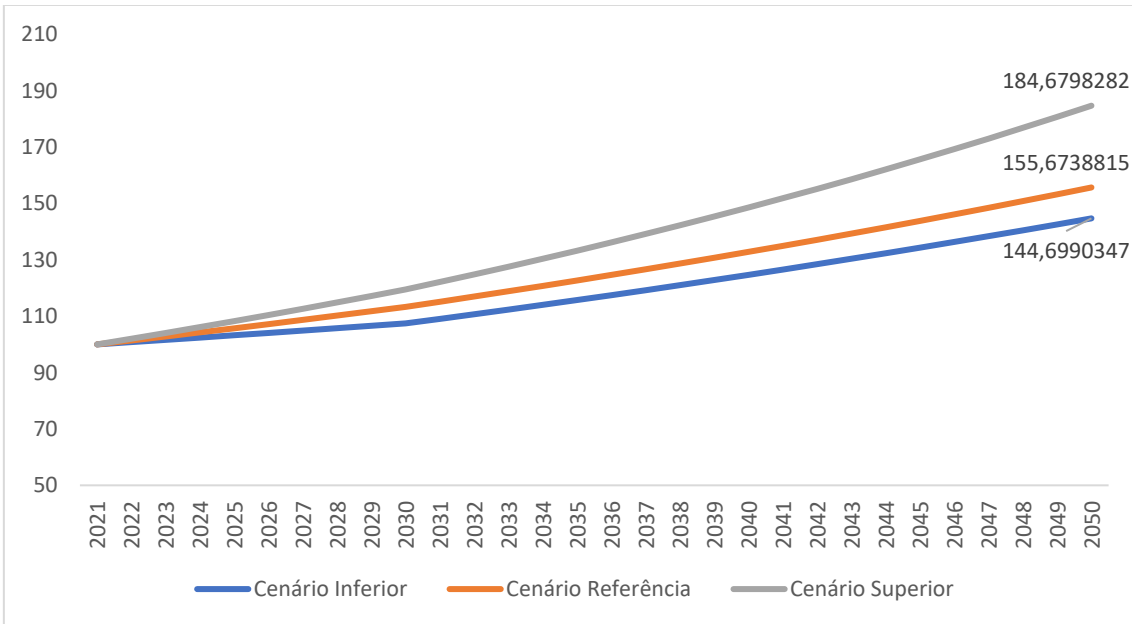


Figura 14 - Evolução Prospectada da Indústria de Transformação Energointensiva Brasileira.



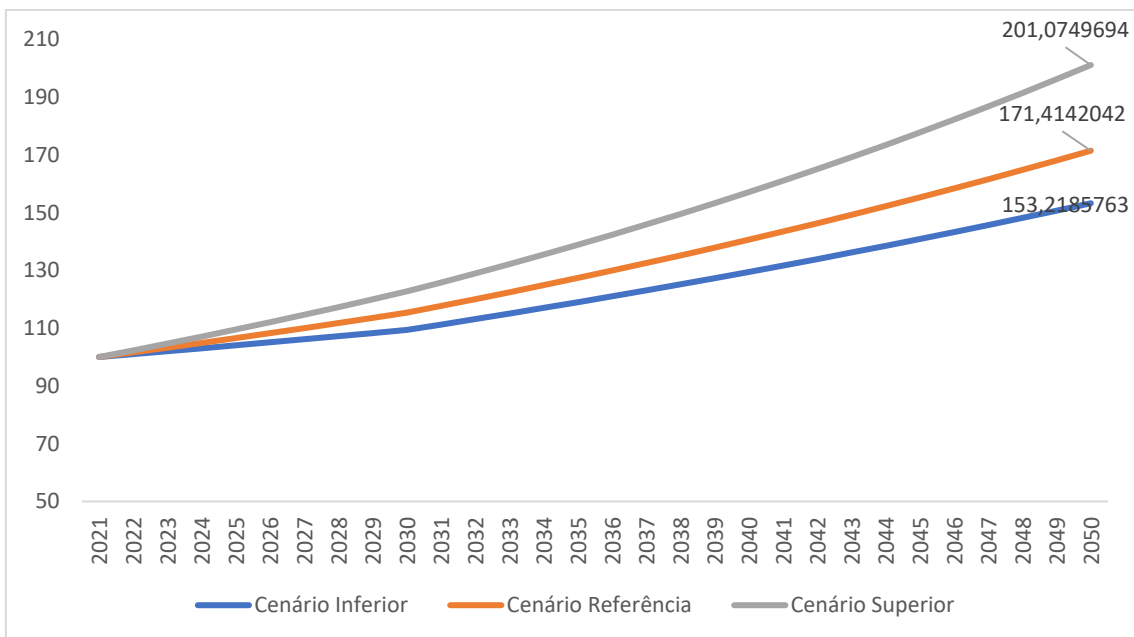


Figura 15 - Evolução Prospectada das Demais Indústrias de Transformação no Brasil.

Para efeitos do estudo em curso de medidas de eficiência energética na indústria, os setores principais a serem analisados fazem parte da indústria de transformação, sobretudo no segmento energointensivo. Desta forma, este documento apresenta no Apêndice A com a estimativa do valor da produção anual das indústrias extrativa mineral, de transformação, de não metálicos, química, alimentos e bebidas, têxtil, papel e celulose e outras.

3.8 Considerações sobre Cenários Macroeconômicos

Com vistas a trazer dados que possibilitem alimentar modelos analíticos focados na quantificação dos benefícios de medidas de eficiência energética no setor industrial brasileiro, o objetivo principal do presente relatório foi apresentar possíveis cenários relativos ao nível de atividade dos diferentes segmentos da indústria brasileira até 2050.

Notadamente, prospecções com horizontes temporais menores lidam com menor nível de incerteza e são mais influenciadas pelo estágio inicial das variáveis críticas envolvidas no problema. Todavia, choques externos recentes vivenciados pela economia mundial tornam mesmo projeções de curto prazo dotadas de elevado nível de complexidade.

Considerando a necessidade de os resultados do projeto em curso serem dotados de aplicabilidade, é importante que os mesmos sejam compatíveis com a lógica analítica comumente usada nos estudos de médio e longo prazo elaborados pela EPE.

Para isso, buscou-se aqui trabalhar com uma abordagem metodológica semelhante. Ou seja, definiu-se premissas capazes de fundamentar narrativas acerca da trajetória dos segmentos industriais brasileiros no horizonte temporal até 2050 em diferentes cenários.



Porém, é preciso enfatizar que isso não significa que os resultados dos cenários precisam coincidir. Novamente, deve ser ressaltado que cenários são narrativas acerca do comportamento futuro de variáveis dotadas de incerteza. Logo, muito sensíveis às premissas adotadas. Especialmente no momento atual, estas premissas tendem a variar bastante em função da sensibilidade do analista e do momento temporal em que os cenários foram construídos.

Portanto, a título de conclusão, ressalta-se que este relatório teve o intuito de apresentar projeções para o nível de atividade econômica dos segmentos da indústria brasileira em diferentes possíveis cenários futuros. Ou seja, segue a lógica “what if” e, desta forma, cria condições para um maior entendimento dos benefícios das medidas de eficiência energética na indústria brasileira em diferentes cenários.

4. Modelo *Top-down* e *Bottom-up*

4.1 Visão geral do modelo proposto

Neste projeto, propõem-se estimar os potenciais (técnico e econômico) de conservação de energia térmica para indústria brasileira considerando o horizonte de longo prazo, até 2050. O setor industrial brasileiro está organizado em uma estrutura hierárquica devido as diferentes indústrias existentes e, ainda, para cada indústria tem-se os respectivos combustíveis que são desagregados por diferentes usos finais.

Neste contexto, será adotada uma abordagem de modelos de previsão do tipo *bottom-up* associada a modelos *top-down*. As abordagens *bottom-up* e *top-down*. Essa abordagem permite analisar o potencial de energia térmica em cada nível da estrutura hierárquica do setor industrial brasileiro. Enquanto a primeira classe de modelos *bottom-up* necessita do levantamento de dados mais detalhados da indústria (uso final, seja de equipamentos ou de processo), a modelagem *top-down* é mais "direta" e agregada, verificando as causalidades do consumo de energia, por meio de modelos econométricos. A abordagem proposta permite que estimativas dos potenciais de conservação sejam feitas considerando cenários macroeconômicos e cenários de difusão tecnológica relacionados às medidas de eficiência energética. Além disso, podem ser consideradas mudanças nos cenários de difusão a partir da indução no mercado provocada por políticas de eficiência energética em setores ou tecnologias pré-definidas. A visão geral desta modelagem pode ser vista na Figura 16 .



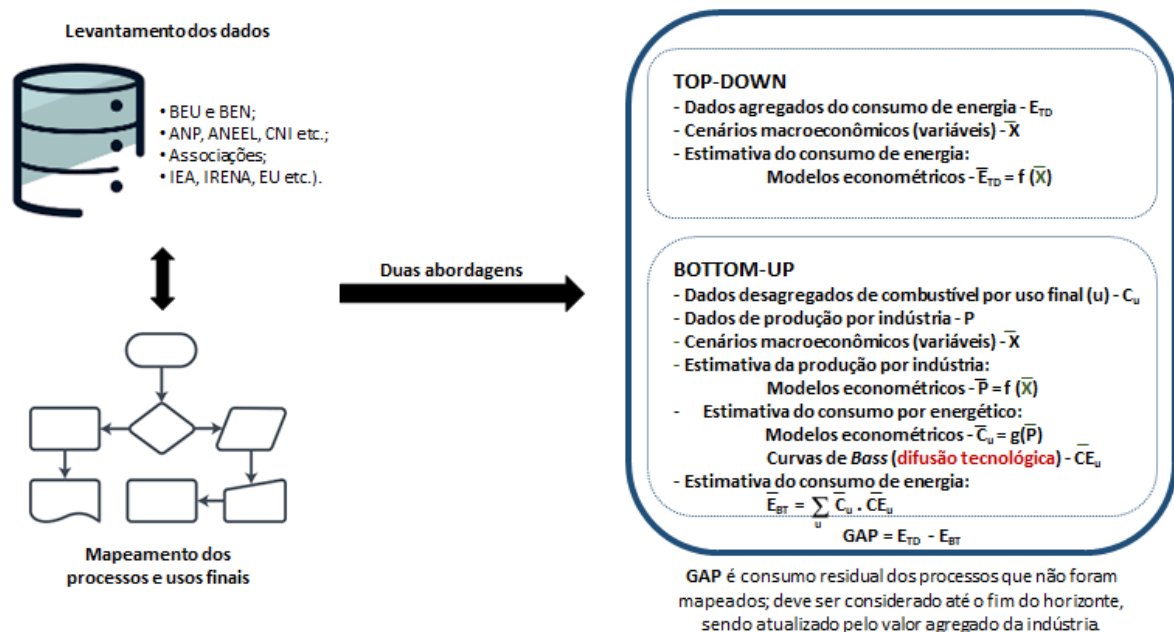


Figura 16 - Visão geral da modelagem proposta.

Primeiramente, devem ser definidos os setores da indústria que serão considerados. Agregações são possíveis conforme a granularidade dos dados. Assim, na primeira fase do trabalho, foram desenvolvidas duas atividades relacionadas ao modelo *bottom-up*: a primeira etapa consistiu no mapeamento dos setores e usos finais das indústrias; e outra foi a obtenção dos dados disponíveis das indústrias por usos finais (Produção, Produto Interno Bruto, Consumo de energia por energético etc.). Pode-se perceber que uma atividade influencia a outra, pois se uma indústria mapeada não tiver dados disponíveis, ele não poderá ser considerado no modelo *bottom-up*.

Os dados históricos do parque industrial brasileiro, estratificado por setores, foram levantados ao menos nas seguintes fontes de informação: Balanço de Energia Útil - BEU; Balanço Energético Nacional - BEN; agências e órgãos nacionais (ANP, ANEEL, CNI etc.); informações setoriais das indústrias; informações das entidades de classe (associações, por exemplo); agências e órgãos internacionais (IEA, IRENA, parlamento europeu etc.).

A partir da construção da base de dados históricos necessários para modelagem *bottom-up*, foram desenvolvidas as seguintes etapas que serão detalhadas nas subseções deste capítulo:

- 1) Ajuste dos modelos econométricos as séries temporais históricas de PIB e produção por setor industrial;
- 2) Ajustar os modelos econométricos as séries temporais históricas de produção por combustível por subsetor industrial;
- 3) Obtenção dos cenários de PIB (cenários: inferior, referência, superior) para horizonte de longo prazo, até 2050;
- 4) Projeção da produção através do modelo econométrico obtido na etapa (1) usando a série projetada do PIB para os cenários definidos;
- 5) Projeção do combustível através do modelo econométrico obtido em (2) usando a série de produção projetada em cada cenário macroeconômico;



- 6) Cálculo de Energia Final por combustível e subsetor considerando cenário de eficiência energética combinados com os cenários macroeconômicos;
 - Cada energético tem coeficiente de determinação definido por uso final;
 - Cada uso final tem um coeficiente de rendimento definido por energético;
 - O coeficiente de rendimento é definido inicialmente para o cenário base;
 - Os valores da curva de difusão são adicionados a cada instante de tempo ao rendimento inicial do cenário base e, assim, gerando o potencial de economia ao longo do tempo;
- 7) Finalmente, obter a evolução de eficiência energética térmica industrial.

No modelo *bottom-up*⁶, o consumo de combustíveis, seja para resfriamento ou aquecimento, se dá em cada processo e equipamentos (uso final), devendo ser estimados via uma análise exérgica. Em cada processo da indústria, serão definidas as variáveis que impactam no consumo de combustível para compor o modelo *bottom-up*. A produção de um determinado processo de um setor da indústria deve ser estimada por meio de modelos econométricos, considerando as variáveis macroeconômicas definidas nos três cenários (referência, inferior e superior). Para se manter a coerência nas projeções, as variáveis macroeconômicas dos modelos *bottom-up* e *top-down* devem ser as mesmas.

Neste projeto, foram considerados quatro cenários de eficiência energética através das curvas de difusões tecnológicas e os três cenários macroeconômicos, como já apresentado.

A modelagem *bottom-up*⁷, por meio das curvas de difusão tecnológica, permite que a difusão seja parametrizada de forma a se estimar o **potencial técnico** que é mais abrangente e o **potencial econômico** que é um subconjunto do técnico. Na Figura 17, o potencial técnico é calculado pela diferença entre a **difusão técnica** (“technical diffusion”) e a **linha de base** (“historic development”); já o potencial econômico é estimado pela diferença entre a difusão econômica (“**cost-effective diffusion**”) e a linha de base.

⁶ SILVA, F. L. C.; SOUZA, R. C.; CYRINO OLIVEIRA, F. L.; LOURENCO, P. M.; CALILI, R. F. A bottom-up methodology for long term electricity consumption forecasting of an industrial sector - Application to pulp and paper sector in Brazil. *Energy*, v. 144, p. 1107-1118, 2018.

⁷ SILVA, F. L. C.; SOUZA, R. C.; CYRINO OLIVEIRA, F. L.; LOURENCO, P. M.; CALILI, R. F. A bottom-up methodology for long term electricity consumption forecasting of an industrial sector - Application to pulp and paper sector in Brazil. *Energy*, v. 144, p. 1107-1118, 2018.



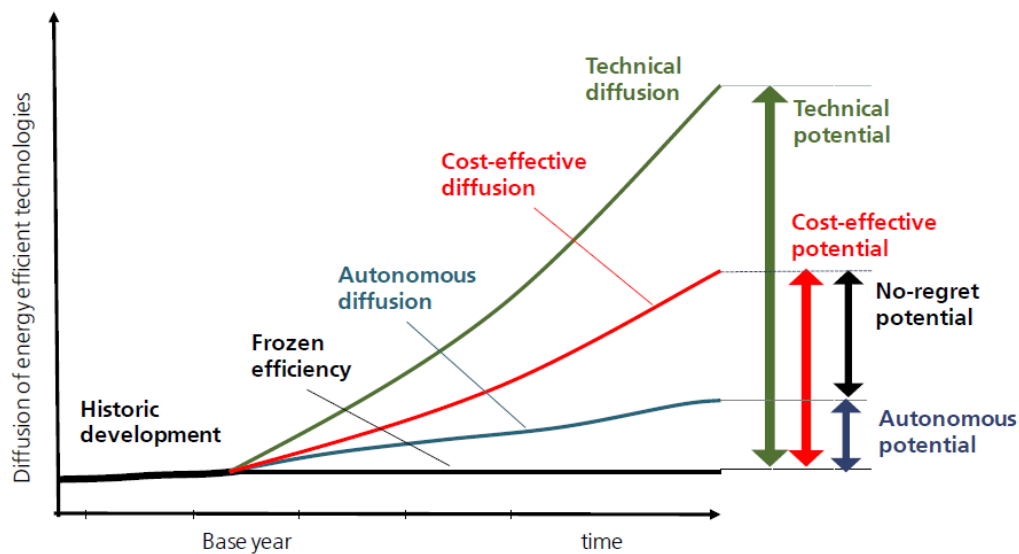


Figura 17. Curvas de difusão tecnológica.

Fonte: Fraunhofer Institute, TEP and IREES (2013)

A seguir o conceito dos cenários de difusão tecnológica, segundo Fraunhofer Institute, TEP and IREES (2013):

- A **difusão autônoma** pressupõe que as barreiras à difusão de tecnologia permanecem altas no futuro e representa uma extrapolação de tendências passadas. As taxas de difusão são entradas exógenas para o modelo e baseadas no desenvolvimento passado e expectativas sobre a decolagem futura da tecnologia. Essas taxas de difusão são tipicamente mais baixas do que seriam caso as empresas decidissem investir em uma medida de eficiência energética (MEE) com base na relação custo-benefício. A difusão autônoma não é sensível ao preço. Representa um limite mais baixo para a difusão econômica.
- A **difusão técnica** não inclui considerações de custo e é baseada em insumos exógenos como a difusão autônoma. Nenhuma reposição prematura de estoque é permitida e, portanto, a difusão ainda pode ser considerada “realista”, embora ambiciosa. Dada a longa vida útil de certos processos, pode-se levar muito tempo para que todo o potencial de economia seja realizado, mesmo no cenário técnico. Pode, portanto, ser chamado de difusão técnica “realista”, pois não inclui as opções de tecnologia completamente irreais e caminhos de difusão. Ela representa o limite superior para a difusão econômica.
- A **difusão econômica** é calculada endogenamente com base no custo das MEEs e certas suposições sobre a tomada de decisões de investimento das empresas. Assume-se que as empresas investem com base no tempo de retorno dos MEEs. Quanto maior o tempo de retorno, mais próxima a difusão econômica fica da difusão autônoma (limite inferior) e quanto menor o tempo de retorno, mais próxima ela fica da difusão técnica (limite superior).

As combinações de cenários (macroeconômicos, difusão tecnológica e cenários de eficiência) são apresentados pela árvore de cenários da Figura 18. Com isso, tem-se 12 cenários, onde o maior potencial de eficiência energética ocorre em um cenário de **crescimento** da economia combinado à difusão tecnológica tendendo à **técnica** e com uma



dinâmica natural do mercado de eficiência energética. Percebe-se que somente a difusão econômica se abre nas dinâmicas induzida e natural, já que as difusões técnica e autônoma são, respectivamente os limites superior e inferior da difusão econômica. A difusão econômica natural é implementada por simples melhoria de eficiência das tecnologias, contabilização de estoque e algumas melhorias frequentemente adotadas pelas MBEs brasileiras. Por outro lado, a difusão induzida é adotada por políticas públicas, considera programas específicos que deverão ser aprofundados, como por exemplo: (i) aumentar o estoque de equipamentos mais eficientes por um programa de rebate; (ii) considerar um programa de gestão de energia nos moldes da ISO 50001 com foco em processos térmicos; (iii) considerar os programas (i) e (ii) sendo adotados ao mesmo tempo. Estes são apenas alguns exemplos, pois serão estudadas as 4 melhores opções regulatórias e políticas públicas que devem ser consideradas nesta análise da dinâmica induzida.

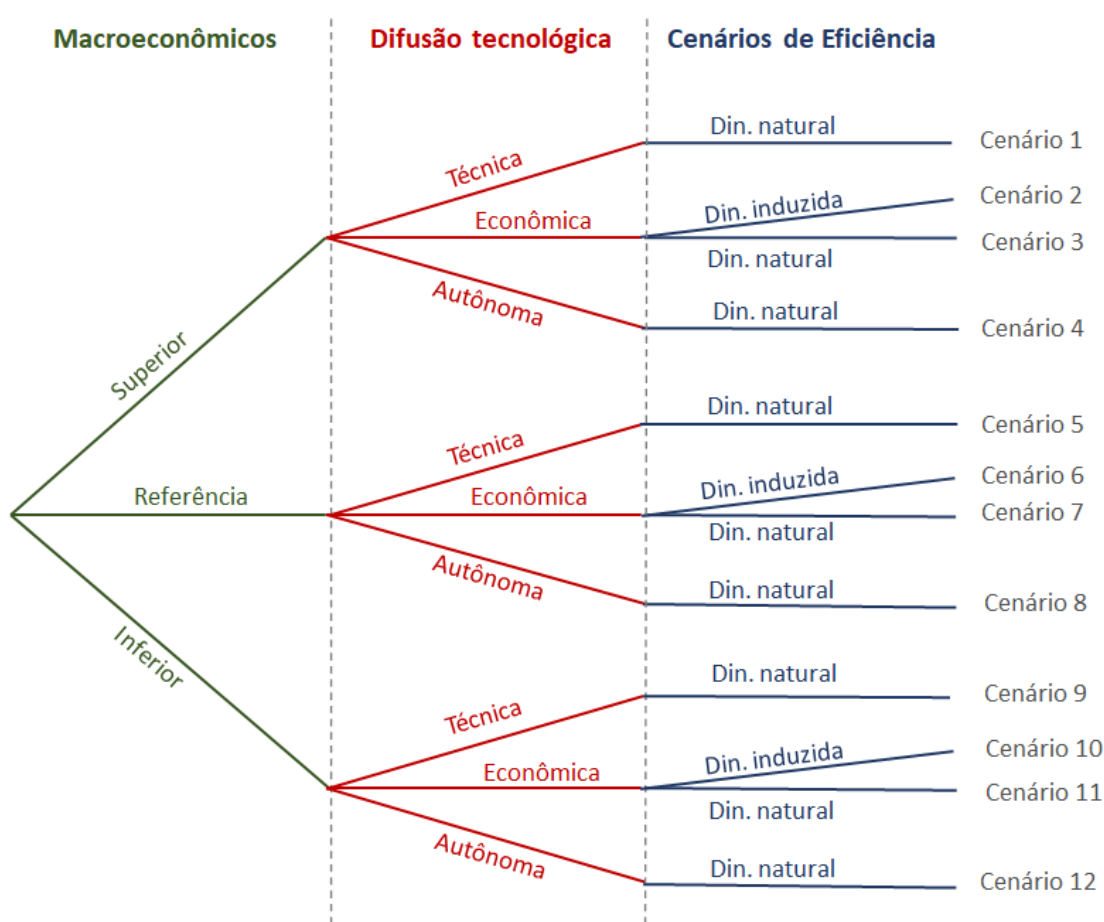


Figura 18 - Árvore de cenários (considera todos os possíveis cenários).

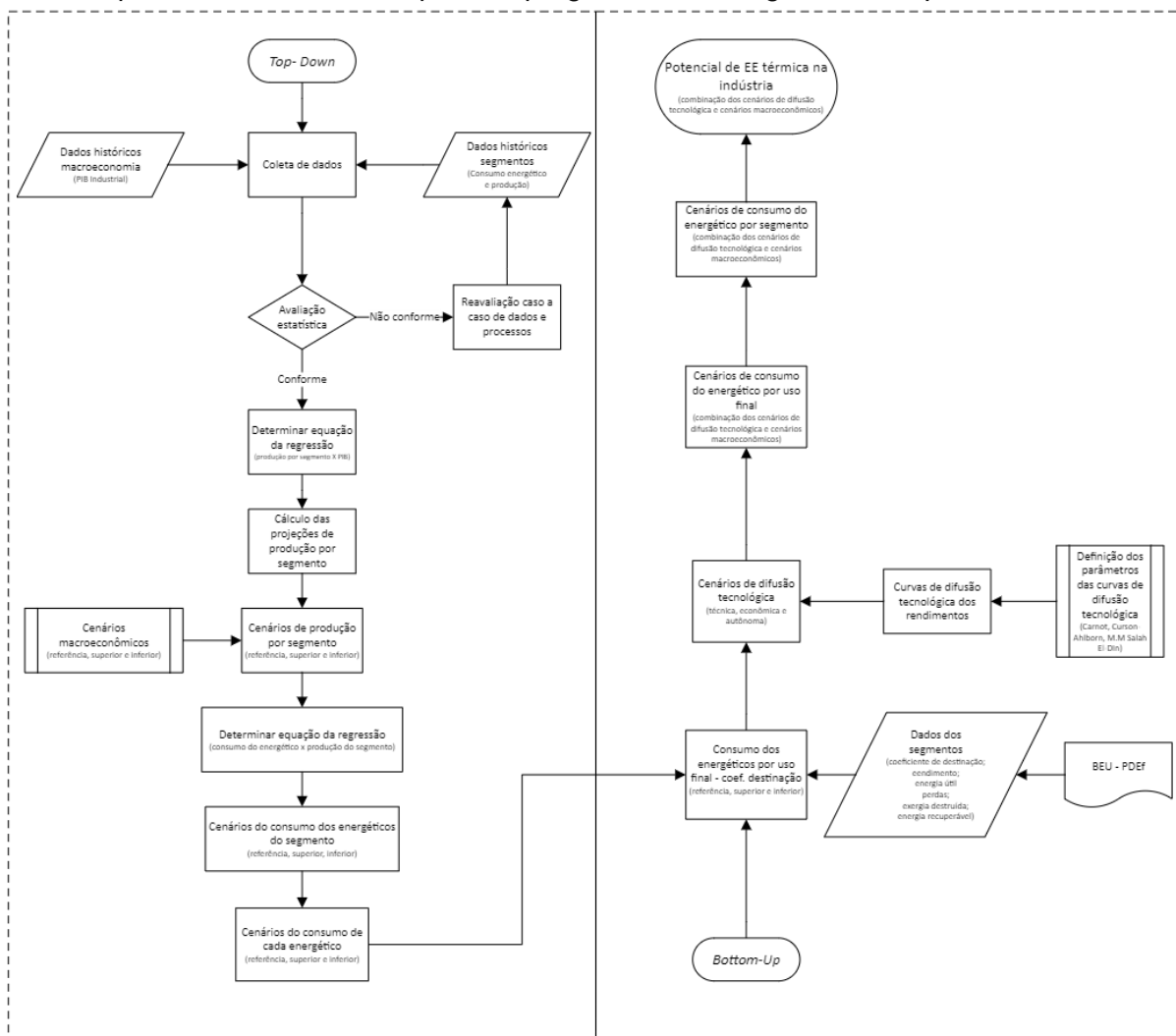
Para fins deste projeto, devido a limitação dos dados, a difusão tecnológica será considerada de forma agregada, pois não foram encontrados dados na literatura que suportasse considerar a difusão por tecnologia. Há uma grande discussão na literatura sobre a definição destes parâmetros, mas mesmo o Instituto Fraunhofer arbitra muitos destes parâmetros por falta de dados. No caso deste projeto, como será feita uma análise exérgica, os limites de Carnot e Curzon e Ahlborn (1975) serão considerados para calibrar os parâmetros de difusão.

Na seção a seguir o modelo proposto será detalhado.



4.2 Detalhamento do modelo proposto – *Top-down / Bottom-up*

Na Figura 19 é apresentado o macro fluxo da metodologia proposta, que foi dividido em duas grandes etapas. À esquerda, de cima para baixo, é apresentado o passo a passo da metodologia *top-down* empregada neste projeto. Já à direita, pode-se verificar, de baixo para cima, os processos necessários para emprego da metodologia *bottom-up*.



4.2.1 O modelo *Top-down*

Na primeira fase do processo, a partir de uma análise dos dados disponíveis, fase de coleta de dados, são definidos os segmentos da indústria a serem considerados, bem como os energéticos e usos finais dentro de cada um destes segmentos. Como colocado na seção em



que foi definido o escopo do trabalho, foram considerados 18 insumos energéticos (Energia Final), 7 usos finais, em 9 segmentos industriais. Além disso, os dados macroeconômicos da indústria também são levantados. Para fins deste projeto, se considerou o PIB industrial.

Os 9 segmentos industriais estão listados a seguir: Cimento; Ferro gusa e aço; Mineração e pelotização; Não-ferrosos e outros da metalurgia; Química; Alimentos e bebidas; Têxtil; Papel e celulose; Cerâmica e Vidro.

Para fins deste estudo, os 7 usos finais considerados são listados na sequência: Aquecimento direto; Calor de processo, na forma de vapor gerado; Força motriz; Refrigeração; Processos eletroquímicos; Iluminação; outros usos finais.

Os estudos serão realizados para os 18 energéticos (Energia Final), a saber: Gás Natural; Carvão Vapor; Carvão Metalúrgico; Lenha; Produtos da Cana; Outras Fontes Primárias; Óleo Diesel; Óleo Combustível; Gasolina; Gás Liquefeito de Petróleo – GLP; Querosene; Gases de Processo; Coque de Carvão Mineral; Eletricidade; Carvão Vegetal; Álcool Etílico; O F S Petróleo; e Alcatrão.

Na sequência é feita uma validação estatística dos dados de produção por segmentos da indústria que foram encontrados na literatura. Considera-se, portanto, a equação de regressão a seguir para se fazer tal validação estatística. Para tanto, são feitas duas análises dos modelos de cada segmento industrial, uma validação física e uma validação estatística.

$$Produção_{segmento} = (\alpha_0 \times PIB) + \alpha_1 \quad (1)$$

Quando se trabalha com análise de regressão, uma importante análise preliminar é a validação física do modelo. O significado físico dos parâmetros é essencial para uma compreensão de como a energia é consumida e como as eficiências de energia podem ser alcançadas a partir de ações de eficiência energética.

Após a validação física do modelo, é necessário realizar uma análise estatística robusta para avaliar a representatividade do modelo, visando minimizar as incertezas existentes e garantir uma previsibilidade dos novos pontos na fase de quantificação dos custos evitados. Neste sentido, optou-se pelos principais testes, são eles:

- Coeficiente de determinação (R2);
- Coeficiente de determinação Ajustado (R2 ajustado);
- Erro médio Quadrado (MSE);
- Coeficiente de Variação (CV);
- Estatística t-student; e
- Estatística F (ANOVA).

Maiores detalhes da modelagem estatística e sua validação podem ser vistos no Apêndice B, onde é feita descrição tanto da validação física quanto da estatística. Os testes estatísticos descritos acima também são apresentados.



Com as equações da produção de cada um dos segmentos da indústria validadas física e estatisticamente (equação 1), podem-se fazer as projeções a partir dos cenários macroeconômicos pré-definidos. Como apresentado na seção que trata sobre a narrativa dos cenários macroeconômicos, cujas projeções do PIB foram feitas para três cenários – referência, superior e inferior – nos horizontes de 2023-2030 e 2030-2050. Para tanto, foram consideradas as seguintes agregações das indústrias: Extrativa; Transformação; Transformação Energointensiva; Outras Transformação; Construção.

Projetada a produção de cada segmento da indústria nos três cenários macroeconômicos, podem ser calculados o consumo de cada energético também para cada um destes segmentos nos três cenários macroeconômicos adotados. O consumo de cada energético é calculado pela equação de regressão a seguir:

$$\text{Consumo}_{\text{Energético}} = (\beta_0 \times \text{produção}) + \beta_1 \quad (2)$$

Estas informações são importantes para próxima etapa da modelagem em que a abordagem *bottom-up* será empregada.

4.2.2 O modelo *Bottom-up*

Na abordagem *bottom-up*, primeiramente são geradas as previsões independentes para cada série no nível mais baixo da hierarquia e, em seguida, elas são agregadas para produzir a previsão dos níveis superiores da hierarquia. Essa abordagem permite a introdução de cenários de Eficiência Energética (EE) no nível inferior da estrutura hierárquica. Desta forma, é possível analisar e avaliar os impactos de implementação de medidas de EE em todos os níveis da hierarquia. Portanto, através desta abordagem é possível identificar os efeitos de implementação de políticas públicas de EE em cada setor industrial.

A modelagem *bottom-up* proposta considera os balanços de energia útil, levando em conta o conceito de rendimento segundo a Primeira Lei da Termodinâmica, sem distinguir as formas de energia. Deste modo, a Energia útil (EU) gerada pela Energia Final *i* no segmento industrial *j* é obtida por:

$$EU_{ij} = \sum_{k=1}^n EF_{ij} \alpha_{ijk} \eta_{ijk} \quad (3)$$

em que *k* representa o tipo de uso final (força motriz, aquecimento indireto, aquecimento direto, produção de frio, iluminação, eletroquímica, outros); EF_{ij} é a Energia Final (energéticos) *i* no segmento industrial *j*; α_{ijk} é o coeficiente de destinação, parcela da Energia Final *i* no segmento industrial *j* que é destinada ao Uso Final *k*; η_{ijk} é o rendimento da



conversão da Energia Final i para o uso final k no segmento industrial j . A Figura 20 apresenta a modelagem dos fluxos energéticos.

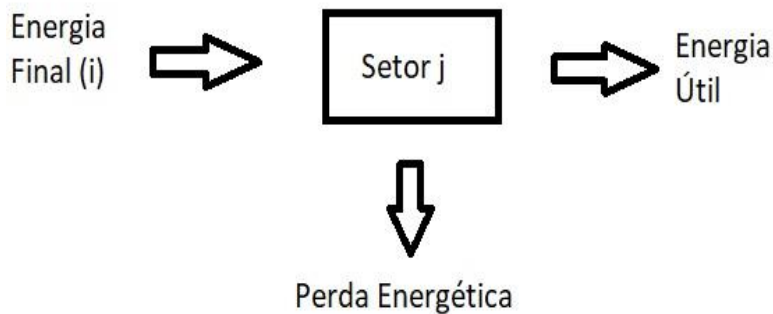


Figura 20 - Modelagem convencional dos fluxos energéticos.

A identificação dos coeficientes de destinação (α_{ijk}), correspondentes à parcela da energia final entregue ao cada segmento industrial que é destinada ao cada uso final, que compõem as tabelas setoriais de coeficientes de destinação, estimados com base em estudos de campo e informações da literatura técnica. Estas tabelas podem ser vistas no Apêndice C.

O estabelecimento dos rendimentos (η_{ijk}) da conversão das diversas formas de energia final nas formas de energia útil em cada setor, que constituem as tabelas setoriais de rendimentos. Esses rendimentos devem representar as condições existentes no ano de referência do balanço ou corresponder a condições prospectivas, levando em conta as estimativas da evolução e penetração de tecnologias de melhor rendimento.

A Energia Final i no segmento industrial j é dada por:

I. Cenário base:

$$EF_{ij} = \sum_{k=1}^n C_{ij} \alpha_{ijk} \quad (4)$$

em que C_{ij} é consumo total do combustível i do setor j .

II. Cenário com eficiência energética:

$$EF_{ij} = EU_{ij} + EP_{ij} \quad (5)$$

A perda energética (EP) será calculada para os cenários base e com eficiência energética.

I. Cenário base:



(6)

$$EP_{ij} = (EF_{ij} - EU_{ij})$$

II. Cenário com eficiência energética:

(7)

$$EP_{ij} = EF_{ij}(1 - \eta_{ijk})$$

em que,

$$\eta_{ijk} = \eta_{ijkB} + [d_{ijk,x}(t) - d_{ijk,x}(t_0)]$$

sendo que η_{ijkB} é o rendimento no cenário base, $d_{ijk,x}(t)$ é o valor da difusão x no tempo t ; $d_{ijk,x}(t_0)$ é o valor da difusão x no tempo inicial t_0 e x é o tipo de difusão (autônoma, técnica ou econômica). O valor da difusão econômica (eco) é obtido por

$$d_{ijk,eco}(t) = d_{ijk,auto}(t) + \alpha * [d_{ijk,tec}(t) - d_{ijk,auto}(t)] \quad (8)$$

em que,

t – difusão no tempo t ;

α – fator de ajuste da curva de difusão econômica (eco);

$d_{ijk,eco}(t)$ – valor da difusão econômica no tempo t ;

$d_{ijk,auto}(t)$ – valor da difusão autônoma no tempo t ;

$d_{ijk,tec}(t)$ – valor da difusão técnica no tempo t .

Na sequência, será apresentado o detalhamento sobre a obtenção da curva de difusão tecnológica.

Quando cabível a identificação da parcela recuperável das perdas energéticas ou a degradação do valor do fluxo de energia em processos de conversão energética, situações que podem ocorrer especialmente quando existem fluxos térmicos relevantes concomitantes a consumos/produção de energia motriz e elétrica, com perspectivas de integração e produção combinada (cogeração), faz sentido adotar uma modelagem mais detalhada. Nesse sentido, os fluxos de energia térmica podem ser traduzidos em seu equivalente em trabalho, considerando processos reversíveis de conversão, mediante os Coeficientes de Carnot (A e B), que dependem apenas da temperatura desses fluxos e da temperatura ambiente, assumida a 25 °C ou 298 K.

Na situação em que se tem fluxos térmicos em temperaturas acima da condição ambiente, condição observada nos processos de aquecimento, quando mediante combustão ou aquecimento elétrico, se fornece energia térmica a alguma carga ou se observa um efluente térmico. Nesses casos, o valor em trabalho reversível (EQ) de uma quantidade de calor fornecida ou cedida (Q) em um processo final de conversão energética é dado por:

$$E_Q = QA_T \quad (9)$$



em que,

Q : Energia cedida para o ambiente em um processo térmico; e

A_T : Coeficiente de Carnot para um fluxo térmico cedido sob uma temperatura T (em graus Celsius) acima da temperatura ambiente, dado por:

$$A_T = \frac{[(T + 273) - T_{amb}]}{T + 273} \quad (10)$$

No caso de fluxos térmicos a temperaturas abaixo da condição ambiente, a condição observada na produção de frio, quando mediante o consumo de energia elétrica (em ciclos de compressão de vapor) ou energia térmica (em ciclos de absorção) se remove energia térmica de alguma carga, reduzindo sua temperatura. Nesses casos, o valor em trabalho reversível (EQ) de uma quantidade de calor fornecida ou cedida (Q) em um processo final de conversão energética é dado por:

$$E_Q = QB_T \quad (11)$$

Onde: Q é a energia cedida para o ambiente em um processo térmico; e B_T é o coeficiente de Carnot para um fluxo térmico absorvido sob uma temperatura T (em graus Celsius) abaixo da temperatura ambiente, dado por:

$$B_T = \frac{[T_{amb} - (T + 273)]}{T_{amb}} \quad (12)$$

Com auxílio desses coeficientes e da homogeneização dos fluxos energéticos, é possível discriminar e caracterizar melhor as perdas energéticas, que podem ser desagregadas em perdas reais e perdas associadas à degradação energética dos fluxos energéticos potencialmente recuperáveis. Deste modo, diferentemente da forma convencional de se trabalhar, o presente trabalho leva em consideração a qualidade da energia. Nesses termos, o diagrama da Figura 21 comparativamente ao diagrama da ele representa melhor o trabalho aqui desenvolvido.



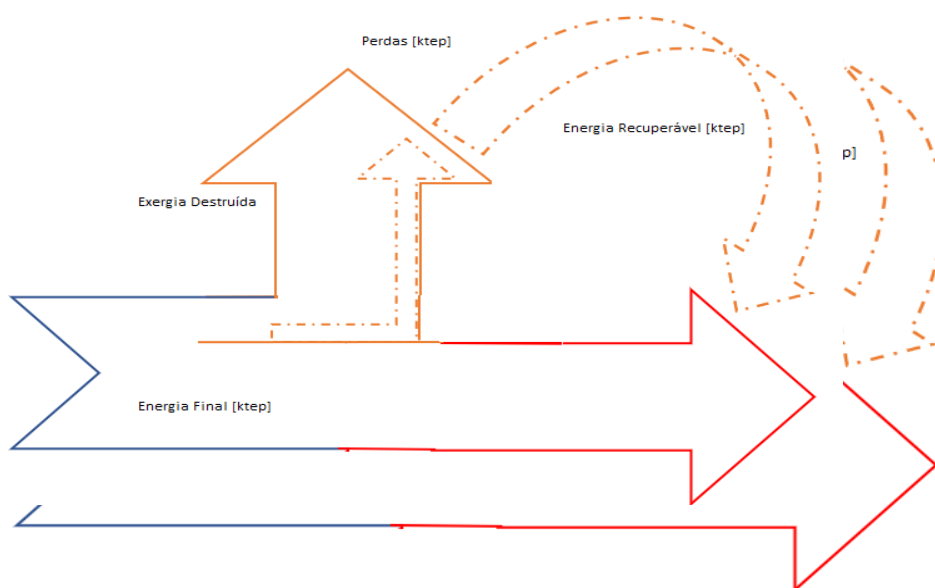


Figura 21 - Diagrama de Sankey genérico adotado neste trabalho.

As temperaturas (T) a serem adotadas nas equações acima podem assumir os valores indicados ou quando disponíveis devem corresponder aos valores observados ou estimados como representativos de processos reais.

Isso posto, as perdas recuperáveis de energia (ER) são calculadas por

$$ER_{ij} = EF_{ij}(1 - \eta_{ijk})F_K \quad (13)$$

em que F_K é um fator relacionado a energia potencialmente factível de ser recuperada que, por sua vez, depende do tipo de uso final K . Em outras palavras ele está intrinsecamente relacionado a exergia uma vez que representa a parcela da energia que seria perdida, mas que passa a ser recuperada devido ao emprego de determinada metodologia.

Dado que o objetivo final, obtido por meio dos coeficientes de difusão tecnológica, é projetar o percentual de energia recuperável tem-se que ter uma preocupação no tocante aos limites teóricos e práticos dos rendimentos. Neste sentido, ainda em relação ao fator F_K é digno de nota que inicialmente ele foi estimado com base no Coeficientes de Carnot A_T e B_T , que é o limite teórico máximo onde mesmo com o máximo de desenvolvimento tecnológico não é possível de ser alcançado na prática.

Tendo em vista o exposto no parágrafo anterior, uma ampla pesquisa bibliográfica foi realizada a fim de se encontrar um rendimento máximo possível de ser alcançado devido a evolução tecnológica. Neste sentido foi encontrado o trabalho (Curzon e Ahlborn, 1975) no qual os autores introduziram um tipo de motor térmico de Carnot em que não há equilíbrio térmico



entre o fluido de trabalho e os reservatórios térmicos. A eficiência do ciclo de Carnot estabelece que a geração de potência é limitada pela razão entre as temperaturas dos reservatórios térmicos. Por sua vez, esses autores, no referido estudo, demonstraram que a máxima eficiência possível de ser alcançada na prática é dada por:

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{T_2}{T_1}} \quad (14)$$

Onde T_1 e T_2 são as temperaturas dos reservatórios térmicos, quente e frio, respectivamente. Quanto ao assunto é refrigeração, o COP de Carnot, que assume um ciclo termodinamicamente ideal no qual não existem irreversibilidades, é frequentemente considerado como uma meta de projeto para ciclos reais. No entanto, o COP de Carnot não considera os mecanismos de transferência de calor. A transferência de calor a uma taxa finita é necessariamente um processo irreversível e inevitável em um ciclo de refrigeração. A falta de consideração dos processos de transferência de calor reduz a utilidade do COP Carnot como um objetivo de projeto realista. Neste sentido, no trabalho (KLEIN, S. A, 1992) as limitações da termodinâmica e da transferência de calor são consideradas para identificar uma meta de projeto mais realista para o COP dos ciclos de refrigeração. A consideração das limitações de transferência de calor leva a uma regra de projeto para a distribuição ideal da área de troca de calor entre os trocadores de calor de baixa e alta temperatura. O COP máximo possível segundo esse trabalho pode ser obtido por meio da seguinte relação:

$$COP = \frac{(T_L - \Delta T)}{T_H - (T_L - \Delta T)} \quad (15)$$

Onde:

$$\Delta T = \dot{Q}_L \frac{(\varepsilon_L \dot{C}_L + \varepsilon_H \dot{C}_H)}{\varepsilon_L \dot{C}_L \varepsilon_H \dot{C}_H} \quad (16)$$

No qual os índices L e H referem-se aos lados frio e quente respectivamente, \dot{C} é a taxa de capacidade térmica (produto entre a vazão mássica pela massa específica do fluido). A relação entre o máximo COP possível e o COP de Carnot pode ser plotado conforme *Figura 22*.



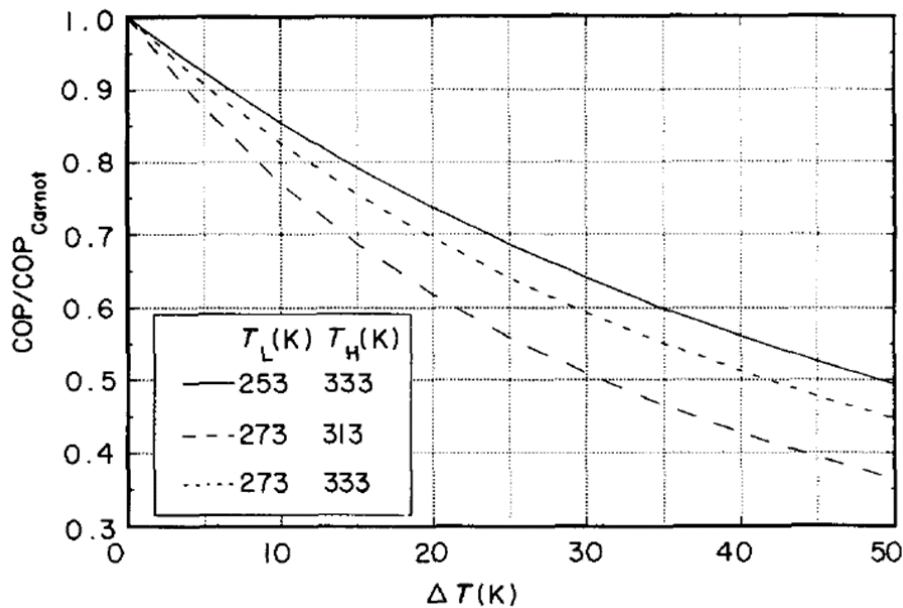


Figura 22 - Relação entre o máximo COP possível e o COP de Carnot para diferentes valores de ΔT e T_L e T_H .

Neste trabalho foi assumido o valor de $\Delta T = 25$ (valor médio da escala do gráfico da Figura 22).

Para utilização do modelo *bottom-up*, são muitos os parâmetros que devem ser considerados por uso final. Estes parâmetros estão definidos no Apêndice C deste relatório. Serão considerados:

- **Força motriz** - Conversões energéticas observadas na combustão ou queima dos combustíveis que proporciona a energia térmica que as máquinas térmicas (motores ou turbinas) convertem parcialmente em força motriz;
- **Aquecimento indireto** - Aproveitando das elevadas taxas de troca térmica possíveis com o uso de vapor saturado e separando o processo de geração de energia térmica mediante combustão e conseqüente produção de gases de chaminé, dos processos subsequentes de utilização dessa energia térmica, e eventualmente utilizando outros fluidos térmicos, o aquecimento indireto é largamente utilizado para atender demandas térmicas em temperaturas médias e baixas, como observado em processos de cozimento, secagem e concentração encontrados em indústrias de alimentos e bebidas, têxteis, papel e celulose, entre outros;
- **Aquecimento direto** - Os processos que necessitam de aquecimento direto, operam geralmente sob temperaturas elevadas, superiores a 1.000 °C. Os gases sob alta temperatura efluentes desses processos podem ser utilizados em sistemas de regeneração e/ou pré-aquecimento do ar de combustão ou da carga, reduzindo significativamente as perdas.
- **Conversão de energia elétrica em energia térmica para aquecimento indireto** - Em alguns processos que necessitam de aquecimento indireto, operando a temperaturas relativamente baixas, pode ser empregado a energia elétrica, em sistemas operando com eficiências aparentemente elevadas. Contudo, a alta qualidade energética disponível na energia elétrica é bastante degradada nessa conversão, como pode ser verificado ao verificar o valor equivalente da energia térmica produzida, com auxílio do Coeficiente de Carnot ou de Curzon e Ahlborn.



- **Produção de frio com energia elétrica** - Os processos que necessitam de aquecimento direto operam geralmente sob temperaturas elevadas, superiores a 1.000 °C. As tecnologias para produção de frio empregando ciclos térmicos de compressão de vapor têm evoluído, incorporando sistemas de controle avançados e trocadores de calor otimizados, alcançando alto desempenho.
- **Produção de frio com energia térmica** - A produção de frio empregando ciclos de absorção, ainda que mais complexa e factível em escalas e condições de operação mais estáveis, representa uma alternativa de interesse para as indústrias que dispõem de excedentes de correntes térmicas de média temperatura e apresentam demandas de frio relevantes, bem como em sistemas de cogeração que operam a montante dos processos de aquecimento indireto. Nessas condições se alcançam grandes economias de energia, permitindo reduzir o consumo de energia elétrica na produção de frio para níveis até duas ordens de magnitude inferiores e no caso de sistemas de cogeração, gerando a partir de combustíveis como o gás natural, energia elétrica e frio.

Vale destacar que os usos finais apresentados anteriormente são aqueles que têm dados disponíveis no BEU do PDEf, única base de dados no Brasil que disponibiliza a destinação do consumo dos energéticos por usos finais. Esta é uma limitação do trabalho, mas no futuro, caso os coeficientes de destinação estejam disponíveis por tecnologia, podem ser feitas mais aberturas.

Ainda no Apêndice C, são apresentados os parâmetros para definição e quantificação da representatividade de determinado uso final/energético em determinado segmento industrial, que chamado de coeficiente de destinação, podendo assim definido: corresponde à parcela da energia final entregue ao cada segmento industrial que é destinada a cada uso final, que compõem as tabelas setoriais de coeficientes de destinação (Apêndice C), estimados com base em estudos de campo e informações da literatura técnica. Neste apêndice serão apresentados os coeficientes de destinação dos 9 segmentos das indústrias para os 18 insumos energéticos (Energia Final) e os 7 usos finais.

Definida a destinação do consumo de energia, bem como os parâmetros de rendimento e de exergia, deve-se determinar como a eficiência energética irá difundir ao longo dos anos. Neste projeto, considerou-se a difusão de forma agregada para cada um dos 18 insumos energéticos e 7 usos finais. Na sequência será feita uma explanação de como são calculadas as curvas de difusão no modelo *bottom-up*.

Curvas de difusão tecnológica

Os potenciais de economia de energia são avaliados a partir da difusão de medidas de eficiência energética, através da mudança de velocidade de uma determinada difusão tecnológica. As diferenças entre as demandas de energia resultantes nas trajetórias de difusão mostram os potenciais de economia de energia. Para a difusão tecnológica serão



utilizadas as curvas de Bass⁸⁹; estas curvas consideram os avanços tecnológicos das máquinas e equipamentos e balizam os níveis de eficiência destes equipamentos utilizados nas indústrias.

As curvas difusão autônoma e técnica (Figura 23) foram construídas com base na função logística (as curvas de Bass¹⁰¹¹), definida por

$$d_x(y) = \frac{D_{x,s}D_{x,f}e^{k_x(y-y_{x,s})}}{D_{x,f} + D_{x,s}[e^{k_x(y-y_{x,s})} - 1]} \quad (17)$$

em que,

- x – tipo de difusão: autônoma ou técnica (auto ou tec);
- k_x – parâmetro de forma que define a inclinação da curva logística para a difusão x ;
- y – ano de interesse
- $y_{x,s}$ – primeiro ano de cálculo da difusão x ;
- $y_{x,f}$ – último ano de cálculo da difusão x ;
- $D_{x,s}$ – valor da difusão x no ano $y_{x,s}$;
- $D_{x,f}$ – valor da difusão x no ano $y_{x,f}$.

⁸ FABBRIANI, L. F.; CALILI, R. F. Proposal of energy efficiency policies for food and beverage industry in Brazil. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 10, 2018.

⁹ SILVA, F. L. C.; SOUZA, R. C.; CYRINO OLIVEIRA, F. L.; LOURENCO, P. M.; CALILI, R. F. A bottom-up methodology for long term electricity consumption forecasting of an industrial sector - Application to pulp and paper sector in Brazil. *Energy*, v. 144, p. 1107-1118, 2018.

¹⁰ SILVA, F. L. C.; SOUZA, R. C.; CYRINO OLIVEIRA, F. L.; LOURENCO, P. M.; CALILI, R. F. A bottom-up methodology for long term electricity consumption forecasting of an industrial sector - Application to pulp and paper sector in Brazil. *Energy*, v. 144, p. 1107-1118, 2018.

¹¹ FABBRIANI, L. F.; CALILI, R. F. Proposal of energy efficiency policies for food and beverage industry in Brazil. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 10, 2018.



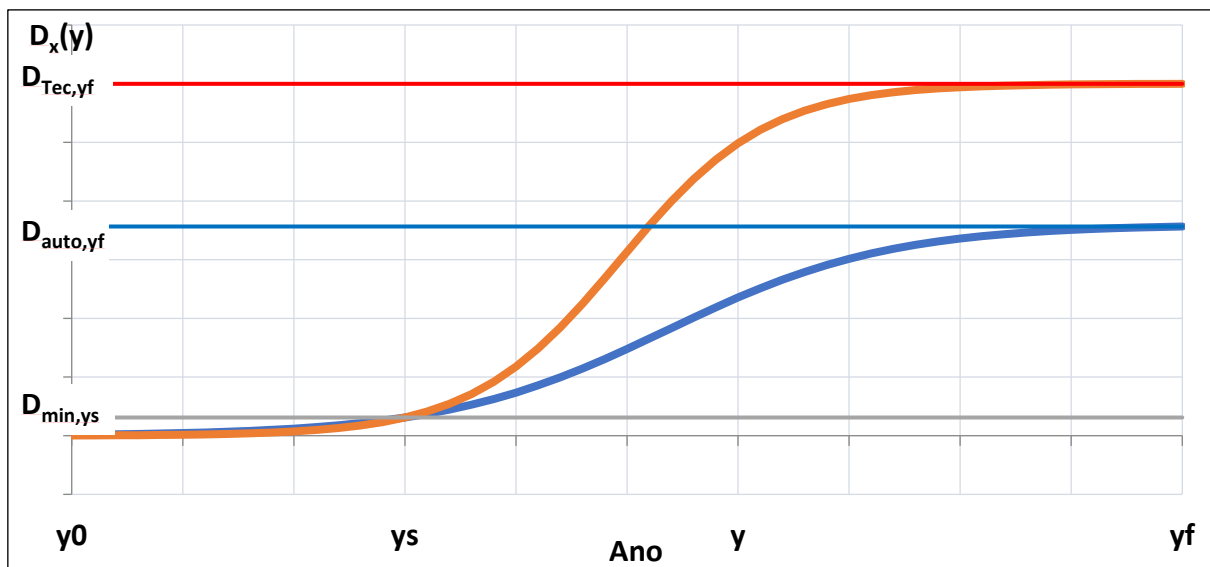


Figura 23 - Curvas de difusão tecnológica autônoma e técnica.

Por outro lado, a curva de difusão econômica foi obtida pela equação (2)

$$d_{eco}(y) = d_{auto}(y) + \alpha[d_{tec}(y) - d_{auto}(y)] \quad (18)$$

em que,

- y – ano de interesse
- α – fator de ajuste da curva de difusão econômica (eco);
- $d_{eco}(y)$ – valor da curva de difusão econômica no ano y ;
- $d_{auto}(y)$ – valor da curva de difusão autônoma no ano y ;
- $d_{tec}(y)$ – valor da curva de difusão máxima no ano y .

O fator de ajuste da curva de difusão econômica leva em consideração o custo de investimento inicial e o custo total de investimento pela medida de eficiência, como pode ser visto na equação 19.

Um importante trabalho a ser realizado é a estratificação dos resultados apresentados neste estudo por tipo de tecnologia. Neste sentido essa seção tem dois objetivos principais. Primeiro, apresentar a formulação matemática que permite fazer a estratificação dos dados por tipo de tecnologia e, segundo, apresentar as justificativas que embasam a decisão de se trabalhar com os dados agregados e não por tipo de tecnologia no âmbito desse trabalho.

Segundo relatório do Instituto Fraunhofer¹², o fator de ajuste da curva de difusão técnica pode ser obtido para cada “saving option” (medida de eficiência energética (EEM)) adotada na modelagem e seguem as equações 20 e 21. Primeiramente, o tempo de retorno de uma

¹² FORECAST - Methodology description, Draft version 0.11, Programme version: 4.0, Last update of manual:15/02/14 - Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research (ISI), TEP Energy GmbH, Institute for Resource Efficiency and Energy Strategies (IREES) - Karlsruhe, Zürich,2014.



“saving option” (EEM) é calculado pela equação (20). Todas as variáveis de custo podem variar no tempo, resultando em mudanças no tempo de retorno.

$$PBT_{so,y} = \frac{C_{so,y}^I}{C_{so,y}^E + C_{so,y}^{EUA} - C_{so,y}^R} \quad (20)$$

em que,

- so – saving option (*eem*);
- y – ano de interesse;
- $C_{so,y}^I$ – custo de investimento (R\$) na so no ano y ;
- $C_{so,y}^E$ – economia nos custos (R\$) de energia com a so no ano y ;
- $C_{so,y}^{EUA}$ – economia nos custos (R\$) com subsídios para a so no ano y ;
- $C_{so,y}^R$ – custo (R\$) de operação da so no ano y ;
- $PBT_{so,y}$ – tempo de retorno da so no ano y .

Para considerar a heterogeneidade entre companhias (níveis diferentes de eficiência de energia, preços de energia diferentes, os quais levam a variações no custo-eficácia de EEMs), uma distribuição da expectativa do tempo de retorno é aplicada, baseada num modelo de crescimento logístico, equação 21. Assim, com o aumento do tempo de retorno, a participação de empresas investindo também diminui.

$$f(PBT) = 1 - \frac{f_{tec}}{1 + \frac{f_{tec} - f(0)}{f(0)} * e^{\beta * PBT}} \quad (21)$$

onde,

- f_{tec} – percentual máximo da difusão para $PBT = 0$ (tipicamente = 1);
- $f(0)$ – valor inicial do percentual da difusão para $PBT = 0$ (percentual tec);
- β – coeficiente da função logística;
- PBT – tempo de retorno da *eem*;

Os resultados ficam entre 0 e 1 (0 – difusão autônoma; 1 – difusão técnica). Portanto, o fator da curva de difusão econômica segue o valor obtido, isto é, $f(PBT) = \alpha$ e $0 \leq \alpha \leq 1$.

Neste trabalho, foi adotada uma equação simplificada para estimar o valor de α devido à dificuldade de obtenção dos dados, mas levando em conta a condição que $0 \leq \alpha \leq 1$.

$$\alpha(t) = \frac{C_{I,t}}{CI_t} \quad (22)$$

em que $C_{I,t}$ custo de investimento inicial no ano t e CI_t é o investimento total.



Pelo equacionamento matemático apresentado anteriormente fica evidenciado que a metodologia aqui empregada tem todo o arcabouço técnico necessário para quantificar o benefício energético devido a difusão tecnológica de determinado equipamento em específico. Todavia, para fins de aplicação no presente estudo, o desperdício evitado de energia será computado de forma agregada, por usos finais, pelos motivos relatados nos parágrafos a seguir.

Deve-se ressaltar que, para que seja feita uma estratificação dos usos finais por tecnologias é necessário ter dados estatisticamente satisfatórios para que os parâmetros dos equacionamentos apresentados nessa seção possam ser tecnicamente estabelecidos.

Embora o Catálogo Virtual de Tecnologias disponibilizado pelo PotencializEE seja um excelente instrumento para auxiliar os profissionais que trabalham direta ou indiretamente com eficiência energética em sistemas térmicos, este ainda não dispõe de dados suficientes, para que as equações 20 e 21 possam ser adotadas.

A título de exemplo será mantido o padrão aqui estabelecido de se referenciar ao setor de Papel e Celulose. No que se refere a este setor, o uso final que possui coeficientes de destinação diferente de zero é o de “Aquecimento indireto”. Portanto, o foco, em termos de Tecnologia disponíveis no catálogo virtual do PotencializEE está em bombas de calor; caldeiras; cogeração; isolamento térmico; queimadores e recuperadores de calor.

Particularmente, em relação a bomba de calor, o catálogo de tecnologia fica devendo em algumas informações que seriam imprescindíveis, a saber: os dados disponíveis para aplicação no setor industrial são incipientes; a vida útil não é informada; faltam dados sobre pressão nominal e fluido de trabalho.

No que se refere às caldeiras, o catálogo de tecnologia ainda não contempla dois importantes equipamentos em termos de recuperação de energia que são o economizador e o pré-aquecedor de ar. Conforme conversado previamente com a equipe técnica do PotencializEE responsável pelo catálogo, foi justificado que ainda não se tem uma decisão sobre como abordar esse tipo de equipamento dentro do catálogo, ou separadamente em uma nova categoria ou dentro da categoria de caldeiras. Agora, em relação aos equipamentos catalogados, falta também a vida útil.

No que tange a cogeração, crucial meio de melhorar a eficiência energética dos sistemas térmicos, o catálogo de tecnologias ainda é bem incipiente, faltando informações básicas, tais como: pressão nominal, tipo de tecnologia de cogeração, eficiência da cogeração e vida útil.

Outra importante forma de evitar o desperdício de energia em sistemas térmicos é o isolamento térmico. Por mais simples e trivial que possa parecer para os técnicos que trabalham com eficiência energética industrial, ainda existem um grande potencial para a



ampla difusão dessa tecnologia, mas para tanto, novamente, seriam necessários dados, que o catálogo de tecnologias ainda não dispõe: transmitância; resistência térmica; vida útil e temperatura do lado “frio” e “quente”.

Em relação especificamente ao banco de tecnologias de queimadores, a informação crucial que é o excesso de ar, é justamente a informação que não está preenchida. Aqui, deve-se ressaltar que o maior potencial de evitar o desperdício de energia quando se trata de aquecimento indireto são o aproveitamento energético dos gases de combustão, vide o próximo parágrafo, e o adequado nível de O₂ na chaminé. Portanto, sem essa informação pouco se pode fazer em termos de levantamento de potencial de eficiência energética.

Por fim, no que se refere aos recuperadores de calor, maior potencial de eficiência energética nesses sistemas, conforme comentado anteriormente, ainda não consta nenhum cadastro no banco de dados de tecnologias.

Destaca-se novamente que os comentários realizados anteriormente não têm nenhum objetivo de diminuir a significativa importância que o banco de tecnologia do PotencializEE tem. O objetivo, além de contribuir com a ferramenta, visa também explicar uma das razões pelas quais a estratificação dos benefícios energéticos por tecnologia não é possível de ser implementada no momento.

Além da questão de disponibilidade de dados comentada nos parágrafos anteriores, deve ser ressaltado também que o trabalho aqui proposto está amplamente estratificado, para recordar: 9 segmentos industriais; cada um contendo 18 energéticos; contemplando 7 usos finais; para 3 cenários macroeconômicos; 4 cenários de difusão tecnológica; para um horizonte temporal de 2022 a 2050. Em termos práticos, tem-se uma ampla combinação de possibilidades. Adicionar mais um nível de estratificação requereria um trabalho adicional que em termos de ordem de grandeza é compatível com o atual.

Os parâmetros utilizados no estabelecimento das curvas de difusão do presente trabalho adotaram os valores utilizados no trabalho pioneiro do (FLEITER, 2012) que empregou pela primeira vez a referida metodologia para determinação do potencial de desperdício de energia evitado no setor de Papel e Celulose na Alemanha. Mais recentemente (SILVA, 2018) empregou a mesma metodologia e os mesmos para executar um trabalho similar na indústria de Papel e Celulose brasileira.

Além disso, os limites de Carnot e Curzon e Ahlborn (1975) serão também considerados para calibrar os parâmetros de difusão. Assim, o máximo de rendimento possível a ser obtido na prática é o de Alborne e Cursion, sendo alcançado no final do horizonte temporal adotado, no caso do trabalho, em 2050.

Deste modo, acredita-se que os resultados aqui apresentados têm a robustez necessária para servir de embasamento na definição de novas políticas públicas (cenário de difusão econômico induzido), conforme será trabalhado no Produto 3 do contrato.

Adicionalmente, os valores obtidos pelos cenários de difusão, em termos de projeção energética com e sem a implementação de ações de eficiência energética, serão comparados



com os resultados obtidos no âmbito dos trabalhos desenvolvidos pelo MME & EPE (2020) e sumariamente apresentados nas tabelas 9, 10 e 11 a seguir.



Tabela 9 – Projeções de economias de energia elétrica nos setores industriais (GWh)

Setor	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Cerâmica	17	35	53	73	92	113	135	157	181	205	231
Ferro-gusa & aço	111	230	353	488	630	763	904	1.045	1.192	1.334	1.485
Não ferrosos	111	242	364	485	643	817	1.004	1.147	1.278	1.423	1.566
Cimento	23	47	72	96	123	151	181	212	245	280	318
Outras indústrias	268	548	846	1.156	1.483	1.826	2.186	2.561	2.958	3.375	3.817
Ferro-ligas	60	124	191	261	351	432	517	606	700	794	893
Alimentos e bebidas	31	67	110	150	190	231	273	316	360	405	450
Química	101	205	313	427	544	667	796	930	1.071	1.216	1.383
Mineracao	72	147	225	309	396	489	586	686	794	905	1.017
Papel e celulose	152	321	505	707	926	1.171	1.409	1.654	1.913	2.195	2.495
Textil	18	37	56	76	96	116	137	159	181	203	226
Total indústria	963	2.003	3.089	4.228	5.475	6.777	8.128	9.473	10.872	12.335	13.882

Fonte: MME & EPE (2020).



Tabela 10 – Projeções de economias de combustíveis nos setores industriais (1000 tep)

Setor	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Cerâmica	32	65	98	133	169	207	246	286	328	372	419
Ferro-gusa & aço	105	218	336	470	610	742	881	1.027	1.178	1.336	1.500
Não ferrosos	9	21	32	43	55	67	80	92	105	118	131
Cimento	18	37	57	77	99	121	145	170	197	225	255
Outras indústrias	19	40	61	83	107	131	157	183	211	240	271
Ferro-ligas	3	7	11	15	18	23	27	32	36	41	46
Alimentos e bebidas	60	129	212	289	367	447	528	612	697	784	872
Química	30	61	93	126	161	196	233	272	312	354	399
Mineracao	10	21	32	44	56	69	84	100	115	131	147
Papel e celulose	56	117	181	248	319	395	476	560	647	740	839
Textil	1	3	5	6	8	9	11	13	14	16	18
Total indústria	345	718	1.118	1.534	1.968	2.407	2.869	3.346	3.842	4.357	4.896

Fonte: MME & EPE (2020).



Tabela 11 – Projeções de eficiência energética (combustíveis e eletricidade) nos setores industriais (1000 tep)

Setor	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Cerâmica	34	68	103	139	177	217	257	300	344	390	439
Ferro-gusa & aço	115	238	366	512	664	808	959	1.117	1.280	1.451	1.628
Não ferrosos	19	42	63	85	110	137	166	190	215	240	265
Cimento	20	41	63	85	109	134	161	189	218	249	282
Outras indústrias	42	87	134	183	234	288	344	403	465	530	599
Ferro-ligas	9	18	27	37	48	60	72	84	96	109	123
Alimentos e bebidas	62	135	222	302	384	467	552	639	728	818	911
Química	39	79	120	163	207	254	302	352	404	458	518
Mineracao	16	34	52	70	91	111	134	159	184	209	234
Papel e celulose	69	144	224	309	398	496	597	702	812	929	1.053
Textil	3	6	9	13	16	19	23	26	30	34	37
Total indústria	427	891	1.383	1.898	2.438	2.990	3.567	4.160	4.776	5.417	6.089

Fonte: MME & EPE (2020).



5. Resultados

5.1 Consolidação dos resultados

A metodologia descrita no presente documento foi implementada em planilhas eletrônicas no Microsoft Excel. As planilhas foram estruturadas em três grupos distintos, aqui nomeadas de 01; 02 e 03 respectivamente, a saber: Planilha 01 - planilha contendo diferente abas de Bancos de Dados e com a modelagem *bottom-up* e *top-down*; Planilha 02 – planilhas com os resultados setoriais e Planilha 03 - uma planilha que consolida todos os resultados (todos os segmentos).

No que se refere a Planilha 01, ela apresenta várias abas com diferentes Bancos de Dados. O primeiro é o histórico de consumo energético por segmento industrial de 1970 a 2021 disponibilizado pela EPE no âmbito do Balanço Energético Nacional – BEN. O segundo é o histórico de produção setorial de 1970 a 2021 disponibilizado também no BEN.

No terceiro, as projeções do PIB, para os diferentes cenários macroeconômicos, foram organizadas em formato de Banco de Dados visando com isso padronizar a estrutura das planilhas. No quarto Banco de Dados constam os valores dos coeficientes de destinação, valores de referência de rendimentos e coeficientes de exergia. O quinto Banco de dados são os resultados das análises estatísticas da modelagem implementada no âmbito do trabalho. O último Banco de Dados se refere a difusão tecnológica no qual constam os rendimentos para os diferentes cenários, energéticos e horizonte temporal adotado.

Por meio desses resultados prospectivos obtidos por meio dos cenários macroeconômicos é possível projetar a evolução do PIB de determinado segmento industrial. Em outra aba é implementada a correlação histórica entre PIB *versus* Produção setorial. Essa correlação é fundamental para o desenvolvimento da metodologia, tendo em vista que, em termos de projeção, a variável conhecida é o PIB, via análise de cenários macroeconômicos, deste modo torna-se possível projetar a produção setorial por meio da respectiva correlação.

A título de exemplo, o gráfico da Figura 24. Apresenta a evolução do PIB (curvas azuis) do setor de Celulose & Papel e a respectiva projeção da produção (curvas alaranjadas).



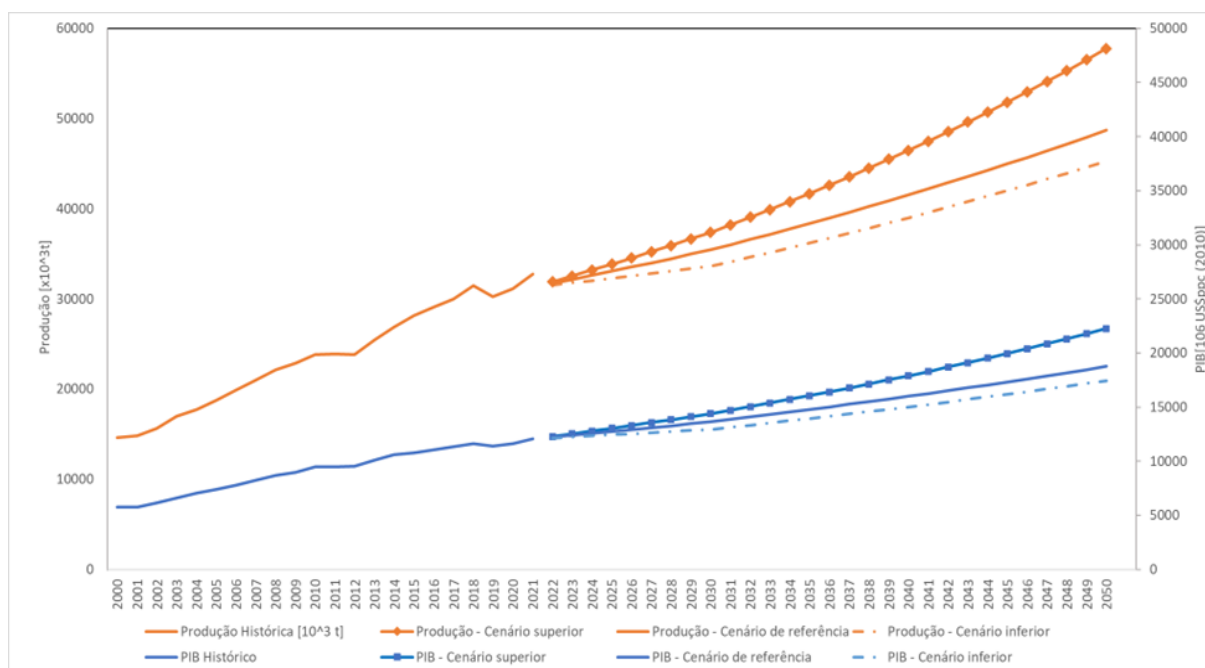


Figura 24 - Projeção do PIB do setor de Celulose & Papel.

Além das diferentes abas com os respectivos Banco de Dados, consta na Planilha 01 também uma aba específica com os dados de entrada, que na verdade são os valores de referência adotados para que se possa trabalhar tecnicamente em termos de energia térmica, conforme apresentado nas tabelas de parâmetros apresentadas no Apêndice C.

Ainda em relação a Planilha 01, o usuário pode selecionar os filtros à sua conveniência para obter os resultados da modelagem *bottom – up* e *top-down* para o setor, energético, horizonte temporal da sua preferência.

A modelagem *top-down* é específica para cada tipo de energético utilizado pelo setor em estudo. A partir dela é possível obter a correlação existente entre consumo do energético e a produção setorial em função do intervalo entre anos escolhido pelo usuário. Como padrão, foi adotado os dados deste século, pois a equipe técnica entendeu que além de possuir uma melhor correlação, por serem dados mais recentes, acredita-se que a fidedignidade deles seja maior. Ainda em relação a essa aba, o consumo do determinado energético é agora projetado em função da produção, que por sua vez foi projetada em função da sua correlação histórica com o PIB, obtida anteriormente. Naturalmente essa projeção do energético se dá também para os três cenários macroeconômicos adotados.

Na modelagem *bottom-up*, os resultados estão estratificados para os três cenários macroeconômicos e para o horizonte temporal adotado (2022 a 2050).

Inicialmente como dado de entrada a planilha usa o consumo energético que foi projetado em função da relação histórica dele com o PIB setorial. Na sequência, por meio do coeficiente de destinação, dos diferentes usos finais, projeta-se os respectivos consumos de energia no



horizonte temporal considerado. Vale aqui destacar que a aplicabilidade do respectivo uso final é função do setor industrial em análise.

Por meio dos diferentes cenários de aumento de eficiência, projetado pelas curvas de difusão tecnológica, encontra-se a energia útil para o respectivo cenário de difusão tecnológica. Deste modo, agora é possível obter o valor das perdas energéticas subtraindo do consumo o valor da energia útil. O próximo desafio é estratificar a perda projetada em “Perda recuperável” e “Exergia destruída”. Para isso faz-se uso dos coeficientes de exergia disponível no Banco de Dados comentado anteriormente, que naturalmente é função do uso final, do energético e do setor.

Ao final, uma consolidação dos resultados é realizada para cada um dos cenários macroeconômicos considerados, projetando assim no horizonte temporal, para os diferentes cenários de difusão tecnológica: a energia final; a energia útil; as perdas totais; a exergia destruída; e a perda recuperável.

Os resultados consolidados são então graficamente ilustrados na forma de curvas de regressão entre Produção versus consumo energético para os diferentes cenários de difusão tecnológica e, por fim, esse gráfico é replicado para cada cenário macroeconômico. Adicionalmente, os resultados são também apresentados na forma de gráfico de barra que soma o consumo/perdas, em função do intervalo entre anos escolhido pelo usuário, para os diferentes cenários macroeconômicos e de difusão tecnológica.

Uma terceira opção de representar graficamente os resultados é por meio do Diagrama de Sankey no qual o usuário escolhe o cenário macroeconômico; o cenário de difusão tecnológica; e o intervalo de anos e a modelagem ilustra graficamente os resultados da energia final; energia útil; perdas; exergia destruída e energia recuperável.

Por fim, a Planilha 02 consolida todos os resultados anteriores, porém agora para todos os energéticos; todos os cenários macroeconômicos; todos os cenários de difusão tecnológica; todo o horizonte temporal adotado; e para as diferentes formas de energia.

Já a Planilha 03 é a consolidação dos dados obtidos a partir da Planilha 02. Portanto novamente, a modelagem possibilita os mesmos filtros e gráficos comentados nos parágrafos anteriores, porém, agora com um novo filtro que é justamente o setor de interesse.

Na sequência, mantendo o padrão, a título de exemplo, as seções objetivam apresentar e comentar os resultados detalhados obtidos para o setor de Papel e celulose. Naturalmente, quando da replicação da metodologia para os demais segmentos industriais, será possível também consolidar os resultados a nível do setor industrial que engloba os nove segmentos industriais em estudo.

Adicionalmente, deve-se destacar que também será dado um enfoque especial no Gás natural para que possa ficar ilustrado o nível de detalhamento da metodologia.



5.2 Resultados específicos para o setor de papel e celulose para o energético gás natural

Após a apresentação e implementação computacional de toda metodologia descrita ao longo deste trabalho, chega-se ao resultado preliminar para o setor de Papel e Celulose e mais especificamente para o energético Gás Natural.

Em termos de estratificação dos resultados eles são obtidos para diferentes cenários de difusão tecnológica, diferentes cenários macroeconômicos e ainda a projeção no horizonte de 2022 a 2050.

Em termos de resultados energéticos propriamente dito eles se referem ao valor da Energia final do setor, obtendo também a quantidade da energia útil a ser empregada pelo setor e por consequência determinando a projeção da quantidade de energia perdida. Tendo em vista a análise exérgica realizada é possível ainda estratificar a energia perdida em exergia destruída e energia recuperável propriamente dita.

A Figura 25 apresenta dos somatórios resultados anuais consolidados considerando o horizonte de 2022 a 2050.

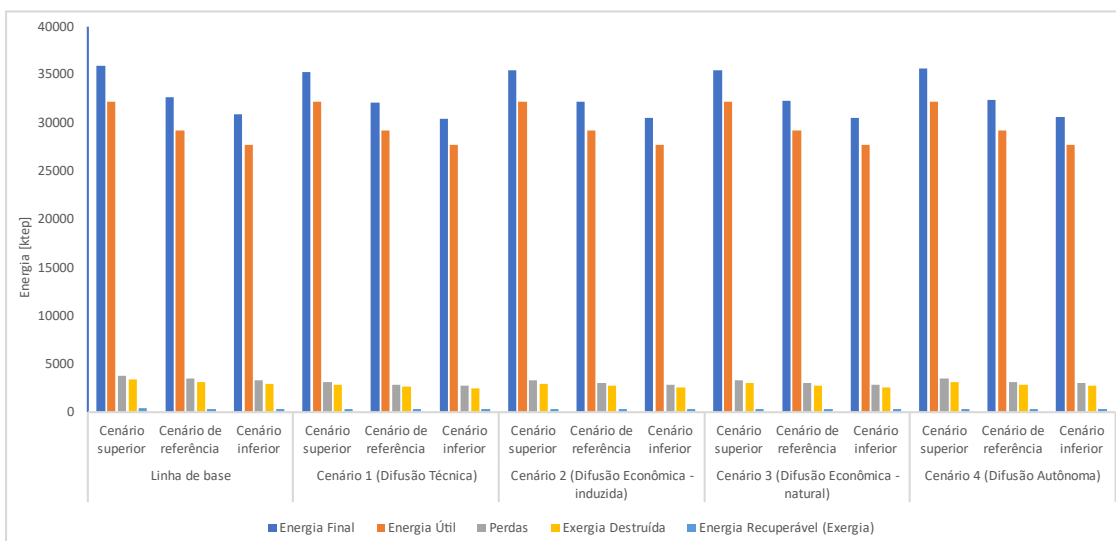


Figura 25 - Resultados consolidados para o setor de Papel e Celulose para o energético Gás Natural.

A modelagem computacional implementada permite o filtro dos resultados por: segmento industrial; energético; cenário macroeconômico; cenário de difusão tecnológica e ainda por ano conforme ilustrado na Figura 26.



E os resultados são apresentados na forma de um diagrama de Sankey, conforme exemplificado na Figura 27.

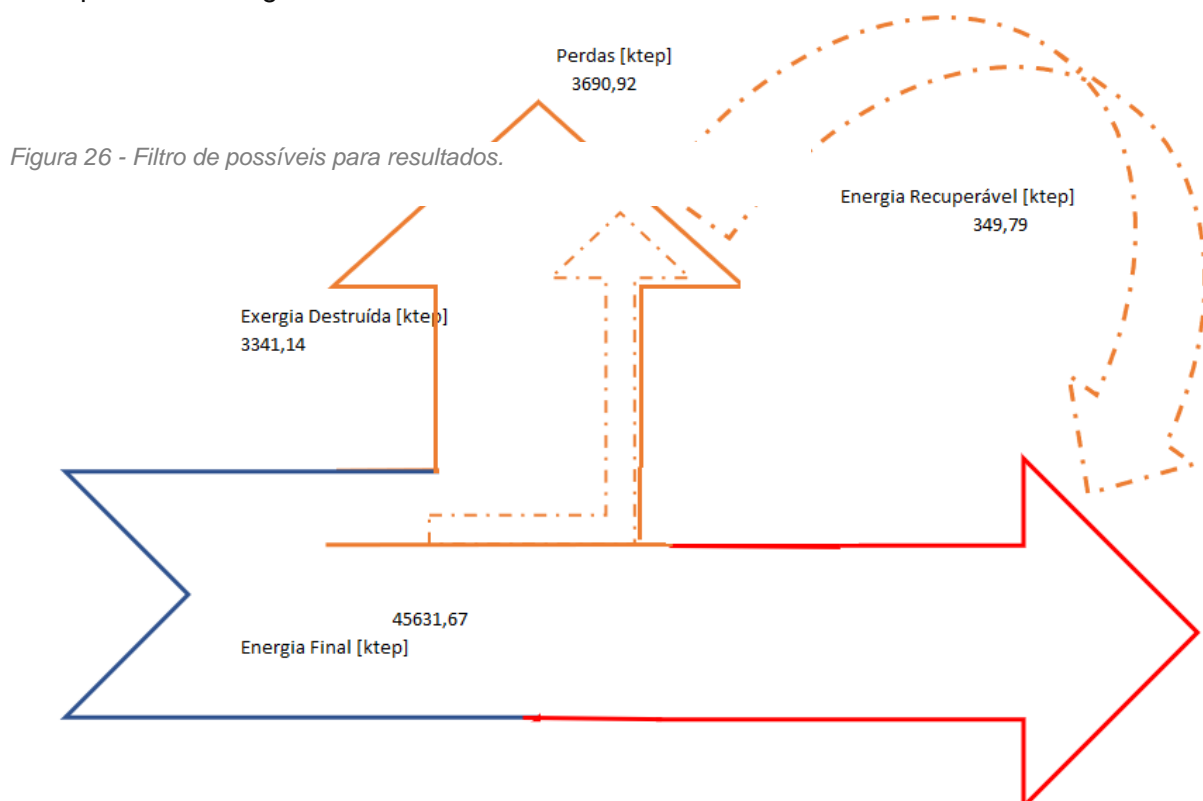


Figura 27 - Resultados consolidados para os filtros implementados.

Pode-se observar na Figura 27 que uma parcela significativa das perdas energéticas não é possível de ser recuperada, “Exergia destruída”, independentemente do nível de avanço tecnológico, por isso é importante destacar que a parcela de atuação da eficiência energética encontra-se na energia que é tecnicamente viável de recuperada, aqui nominada de “Energia recuperável”. Essa forma de analisar a questão da eficiência energética térmica quebra diversos paradigmas, pois, principalmente, nivela a figura do planejador em termos do potencial tecnicamente factível de ser obtido. Em outras palavras, o desperdício de energia térmico é relativamente grande, porém, parte das perdas são decorrentes de imposições de leis físicas da natureza.



Outra forma de apresentar os resultados é na forma de diagrama de Pareto, conforme Figura 28.

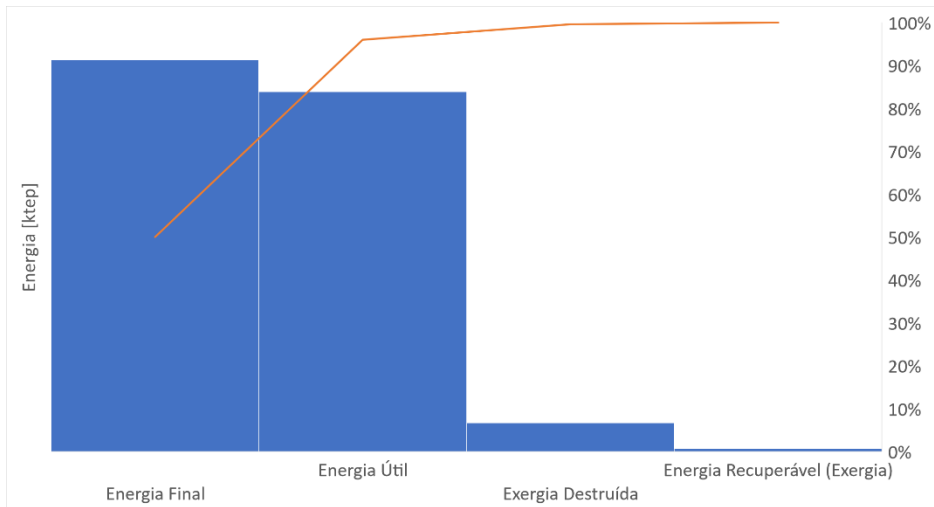


Figura 28 - Diagrama de Pareto para os resultados preliminares.

Apesar de ser somente uma forma diferente de apresentar os resultados, essa ferramenta é muito comum de ser utilizada na tomada de decisão. Sendo, portanto, útil na comparação entre as formas de energia aqui analisadas.

Outra forma interessante de apresentar os resultados é correlacionando em um mesmo gráfico a produção com o consumo do energético projetado. A Figuras 29, 30 e 31 a seguir apresentam os resultados para os três cenários macroeconômicos e para os diferentes cenários de difusão tecnológica. Observa-se que, em virtude da melhoria da performance devido a difusão tecnológica, se reflete na redução da inclinação da curva quando comparado a linha de base (resultados históricos) e quando comparado com os diferentes cenários de difusão tecnológica. Naturalmente, uma menor inclinação reflete em uma melhor eficiência, pois para um mesmo nível de produção o consumo de energia é menor quando comparado com a linha de base ou até mesmo quando se compara cenários de difusão tecnológicos diferentes.

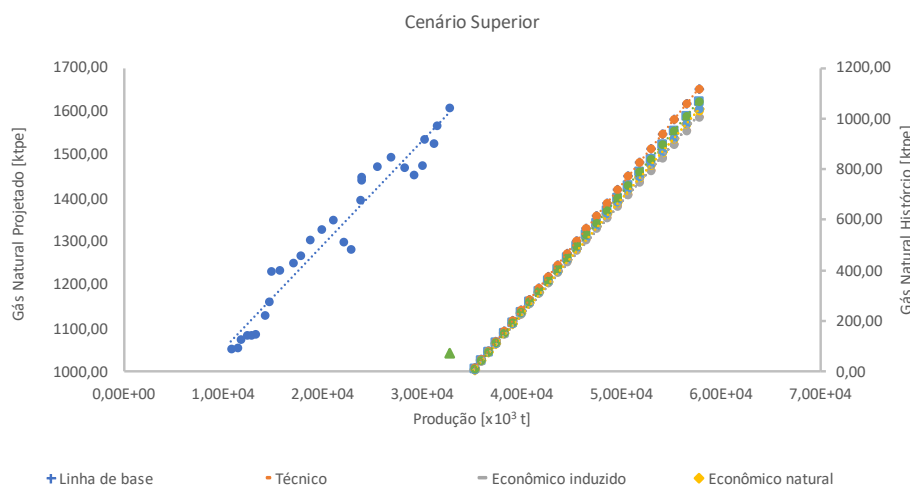


Figura 29 - Correlação entre produção setorial e consumo do energético – cenário superior.



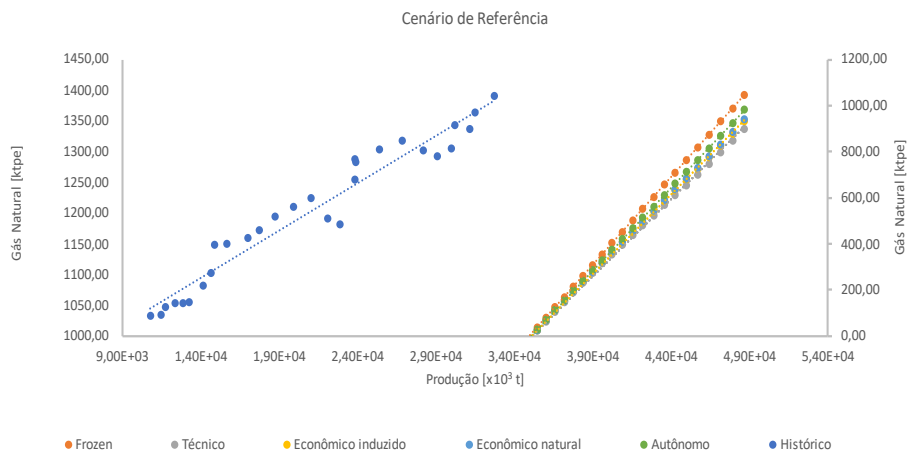


Figura 30 - Correlação entre produção setorial e consumo do energético – cenário de referência.

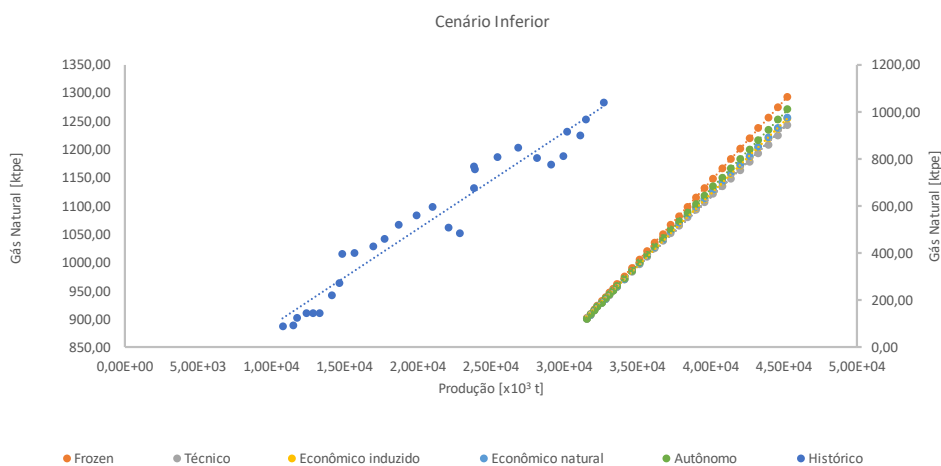


Figura 31 - Correlação entre produção setorial e consumo do energético – cenário inferior.

5.3 Resultados consolidados para o setor de papel e celulose

Em relação aos resultados consolidados para o segmento de papel e celulose, são apresentados a seguir alguns resultados gráficos que serão replicados para os demais segmentos e servirão de base para o entendimento dos resultados finais consolidados.

Um primeiro resultado interessante é analisar em forma de diagrama de Pareto qual é o energético mais representativo em termos de energia Final, útil, perdas, exergia destruída e energia recuperável. Como o objetivo aqui é meramente exemplificar os resultados possíveis,



apresenta-se na Figura 32 a energia recuperável no segmento de Papel e Celulose para todos os energéticos, considerando ainda o cenário macroeconômico de referência e o Cenário 3 (Difusão Econômica - natural).

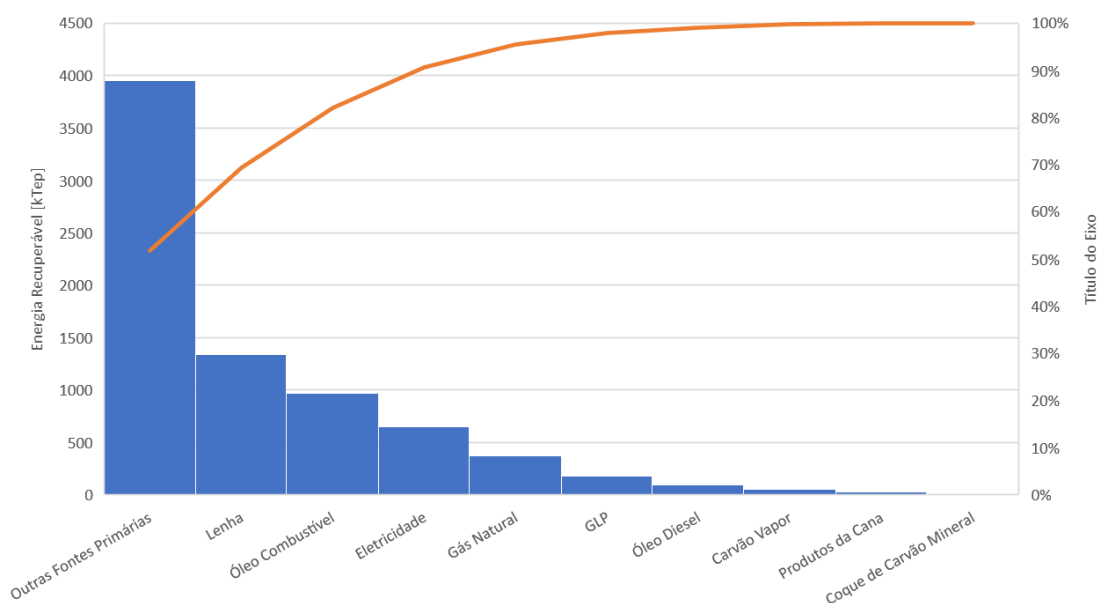


Figura 32 - Diagrama de Pareto para a energia recuperável no segmento de Papel e Celulose.

Por meio desse gráfico é possível priorizar, por exemplo, iniciativas em função do maior potencial de energia recuperável. Observa-se que no caso específico “outras fontes primárias” possuem a maior quantidade de energia recuperável possível no segmento de Papel e Celulose. Sendo assim, deve receber atenção especial quando do estabelecimento de Políticas públicas específicas e no tocante a difusão tecnológica de equipamentos que atuam particularmente com esse combustível.

A Figura 33, similarmente a Figura 25 apresenta os resultados gerais, porém agora consolidado para todo o segmento de Papel e Celulose. Novamente, quando da consolidação de todos os resultados um gráfico similar será construído contemplando os resultados gerais dos nove segmentos em estudo.



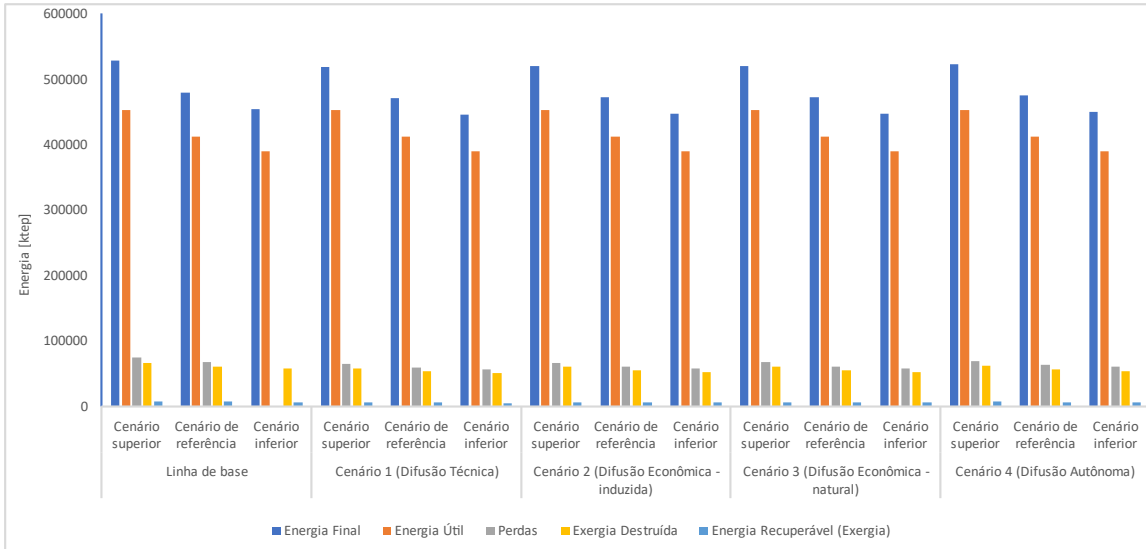


Figura 33 - Resultados gerais para o segmento de Papel e Celulose.

Por fim, apresenta-se na Figura 34, a título de comparação, os resultados da presente modelagem com os resultados obtidos no estudo MME & EPE (2020), no caso específico para o setor de papel e celulose. Antes de analisar os resultados é válido destacar que os horizontes temporais são distintos, porém tem-se uma interseção nos anos iniciais. Para que a análise pudesse ser realizada em uma mesma base, foi anulado o consumo de energia

evitado nos anos iniciais, porém mantida a mesma inclinação da curva prevista. Ainda é válido destacar que o cenário macroeconômico adotado é o superior e ainda que o cenário de difusão é o técnico, portanto o mais otimista da presente modelagem.

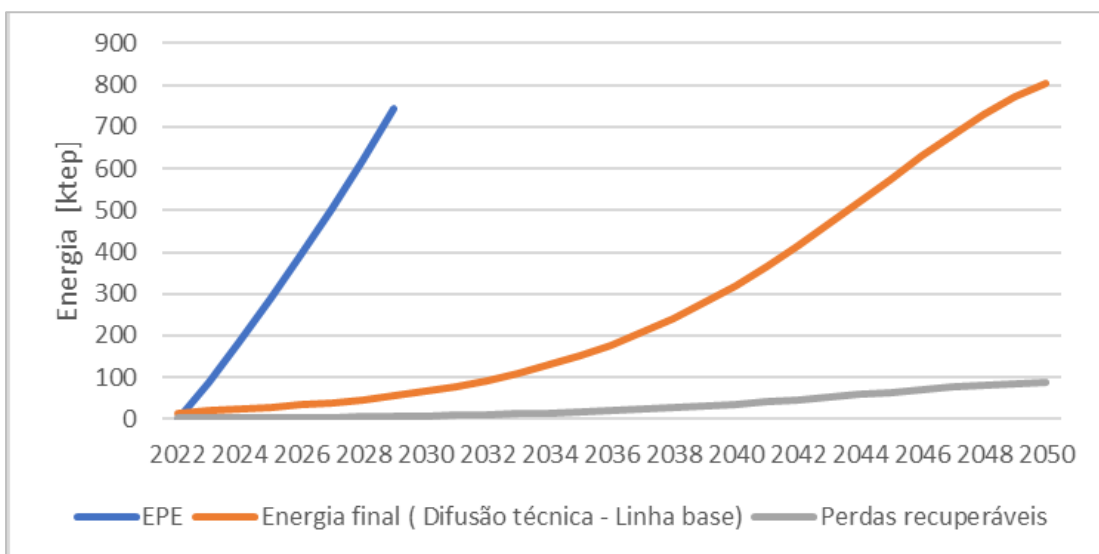


Figura 34 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020).



Em relação a curva laranja ela representa, nos cenários comentados anteriormente, a diferença entre a energia final da difusão técnica e a linha de base. Observa-se, como esperado, que a ótica do planejador é sempre mais otimista, pois em termos de ordem de grandeza da projeção do consumo de energia evitado a presente modelagem, no cenário mais otimista possível, alcança os mesmos níveis somente no fim do horizonte temporal aqui considerado, que é significativamente maior que o trabalho da MME & EPE (2020). Esse comportamento pode ser justificado devido a forma como a curva de difusão tecnológica foi calibrada, ou seja, considerando que os rendimentos máximos seriam alcançados apenas no final do período. Importante também lembrar que os rendimentos aqui adotados foram os mesmos utilizados pelo estudo comparativo. A justificativa basilar dessa premissa é o conservadorismo, pois a equipe técnica considerou excessivamente otimista a visão do planejador.

Naturalmente a quantidade de “Perdas recuperáveis” é maior para o cenário de difusão autônoma, onde existe “mais espaço” para melhorias. Como consequência, comparativamente à linha de base, o cenário de difusão técnica é o que apresenta o menor valor. Deste modo, mais uma vez agindo de forma conservadora, optou-se por representar a curva cinza, que representa a diferença entre as “Perdas recuperáveis” do no cenário de difusão técnico e a linha de base. Para evitar poluir o gráfico, optou-se por não representar as demais curvas.

5.4 Resultados consolidados para todos os segmentos industriais estudados

Essa subseção está dividida em duas partes. A primeira, contempla os resultados em termos energéticos consolidados para todos os seguimentos industriais. Em um segundo momento são apresentados os resultados em termos de emissões de gases de efeito estufa.

5.4.1 Resultados energéticos consolidados

A Figura 35, similarmente as Figura 25 e Figura 33, apresenta os resultados gerais para todos os energéticos, porém agora consolidado também para todos os segmentos industriais estudados.



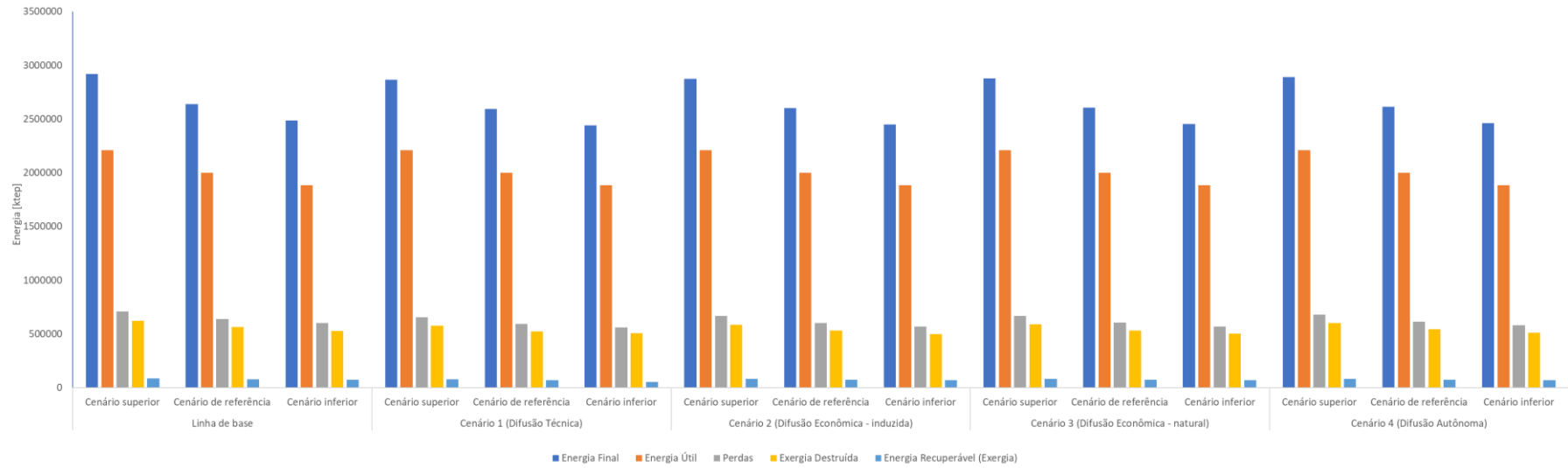


Figura 35 - Resultados gerais em termos energéticos para todos os segmentos industriais estudados e para todos os energéticos



Em relação a representatividade dos energéticos, o resultado apresentado na Figura 36 é um complemento do resultado apresentado na Figura 32 para a energia recuperável, uma vez que o primeiro se referia apenas ao segmento de Papel e Celulose e agora os resultados são para todos os segmentos industriais. Naturalmente, a título de comparação, os resultados apresentados são para todos os energéticos, considerando ainda o cenário macroeconômico de referência e o Cenário 3 (Difusão Econômica – natural).

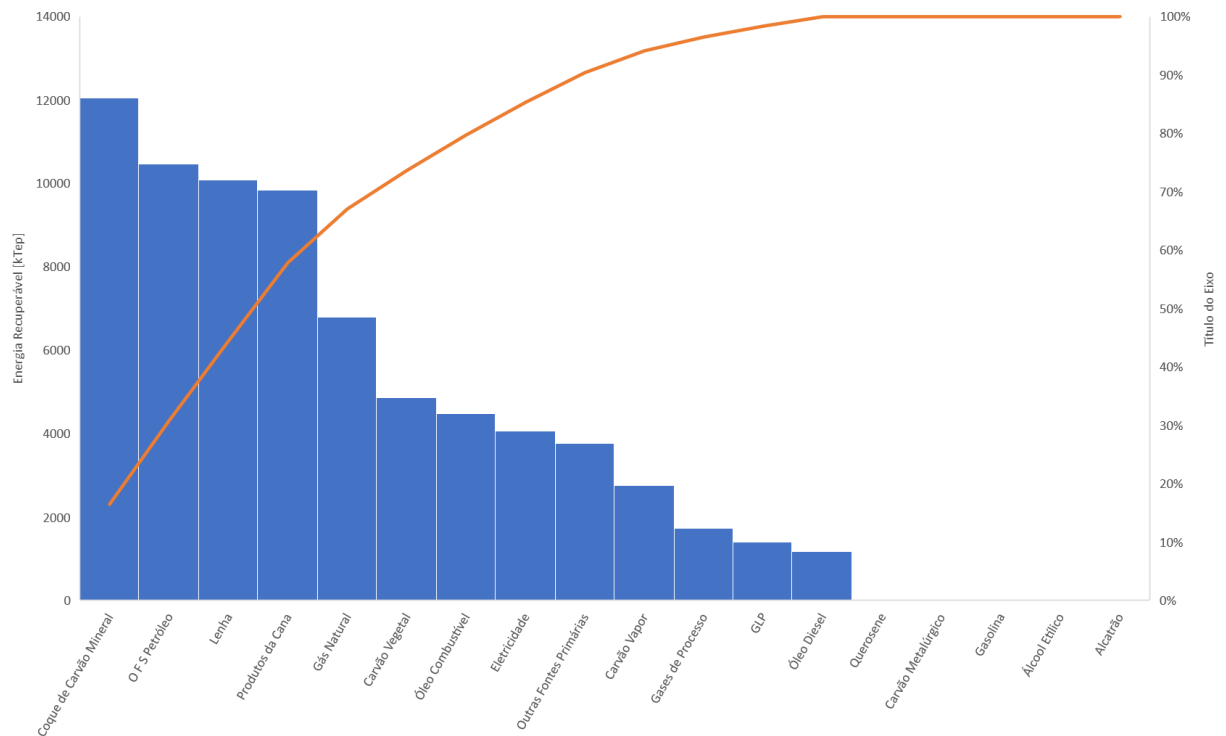


Figura 36 – Diagrama de Pareto para a energia recuperável considerando todos os segmentos industriais analisados

Observa-se na Figura 36 que o resultado consolidado indica que o Coque de Carvão Mineral é o energético com maior quantidade de energia recuperável, isso quando se consolida os resultados de todos os segmentos industriais. Sendo assim, torna-se oportuno apresentar o comportamento do gráfico consolidado para este energético nos diferentes cenários macroeconômicos e de difusão tecnológica, Figura 37. Vale destacar também que há um potencial elevado de energia recuperável para o OFS de Petróleo, a Lenha e Produtos da Cana.



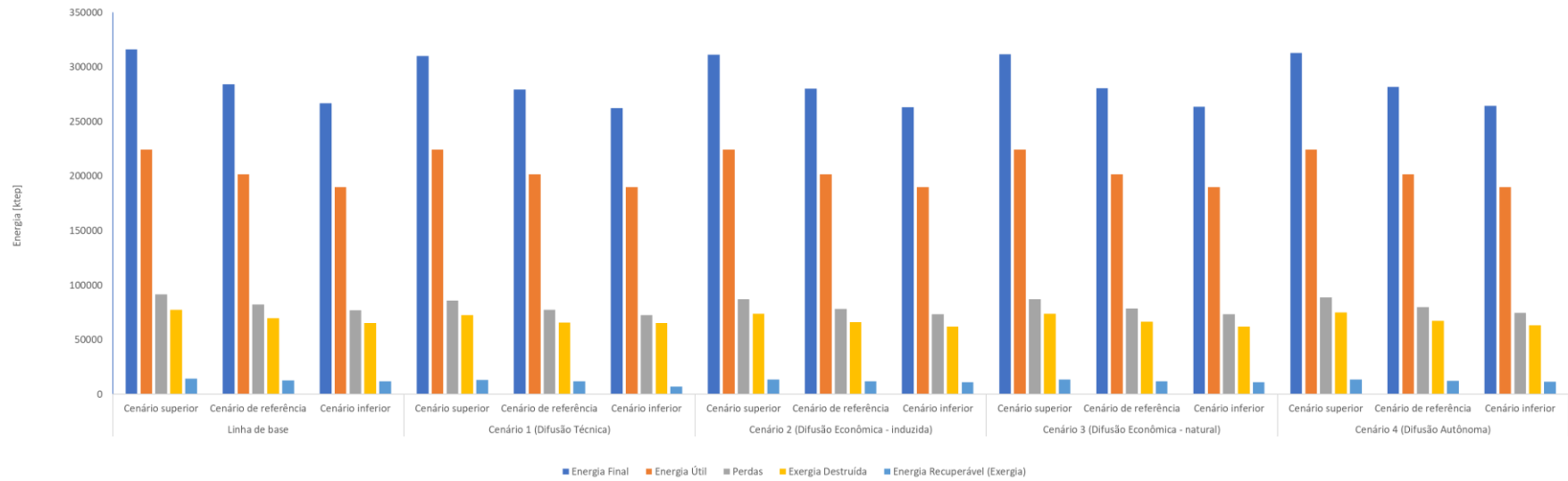


Figura 37 - Resultados gerais para todos os segmentos industriais estudados e específico para Coque de Carvão Mineral



5.4.2 Emissões de Gases de Efeito Estufa

Os resultados apresentados nessa subseção são, na verdade, uma continuidade dos apresentados na seção 5.4.1, porém, agora específicos para a questão das emissões dos gases de efeito estufa.

Para cálculo das emissões, considerou-se uma tabela dos fatores emissões adotadas no PotencializEE com base em dados disponíveis na literatura para alguns energéticos. A equipe do projeto também fez os cálculos dos fatores de emissões com base nos dados disponibilizados em EPE (2022)¹³. Na tabela 12, nota-se que os valores calculados pela FACTO/PUC-Rio são bem próximos aos adotados pelo PotencializEE. Assim, adotou-se os fatores de emissão do PotencializEE quando estes estavam disponíveis; quando não, utilizou-se o estimado pela equipe deste projeto.

Tabela 12 – Fatores de emissões por energéticos (tCO₂e/MWh)

Combustível	FACTO/PUC-Rio	PotencializEE
Gás Natural	0,2020	0,2022
Carvão Vapor	0,3475	
Carvão Metalúrgico	0,3421	
Lenha	0,0068	0,0068
Produtos da Cana	0,0068	0,0068
Outras Fontes Primárias	0,0009	
Óleo Diesel (1)	0,2668	0,2675
Óleo Combustível	0,2790	0,2794
Gasolina	0,2500	0,2504
GLP	0,2310	0,2272
Querosene	0,2590	0,2596
Gases de Processo (2)	0,1600	
Coque de Carvão Mineral	0,3867	
Eletricidade	0,0860	0,0860
Carvão Vegetal	0,0240	0,0240
Álcool Etílico	0,0009	
O F S Petróleo	0,2648	
Alcatrão	0,3867	

(1) Utilizou-se um deflator vinculado aos fatores de emissão do diesel de modo a captar o benefício da redução de emissão devido à mistura do biodiesel. Esse deflator é equivalente ao percentual de mistura do biodiesel no diesel mineral.

(2) Foi considerado para esse energético o mesmo valor de gás de coqueria (EPE, 2022).

¹³ EPE (2022). INFORMATIVO TÉCNICO n. 011/2022. Apresentação da metodologia e dos fatores de emissão utilizados para as estimativas de emissão de GEE nos planos de energia, no BEN e demais produtos da EPE.



O gráfico da Figura 38 apresenta os resultados globais em termos de emissão. Destaca-se que são apresentados os resultados para os quatro cenários de difusão tecnológica; para os três cenários macroeconômicos; e ainda para as formas de energia consideradas neste estudo.



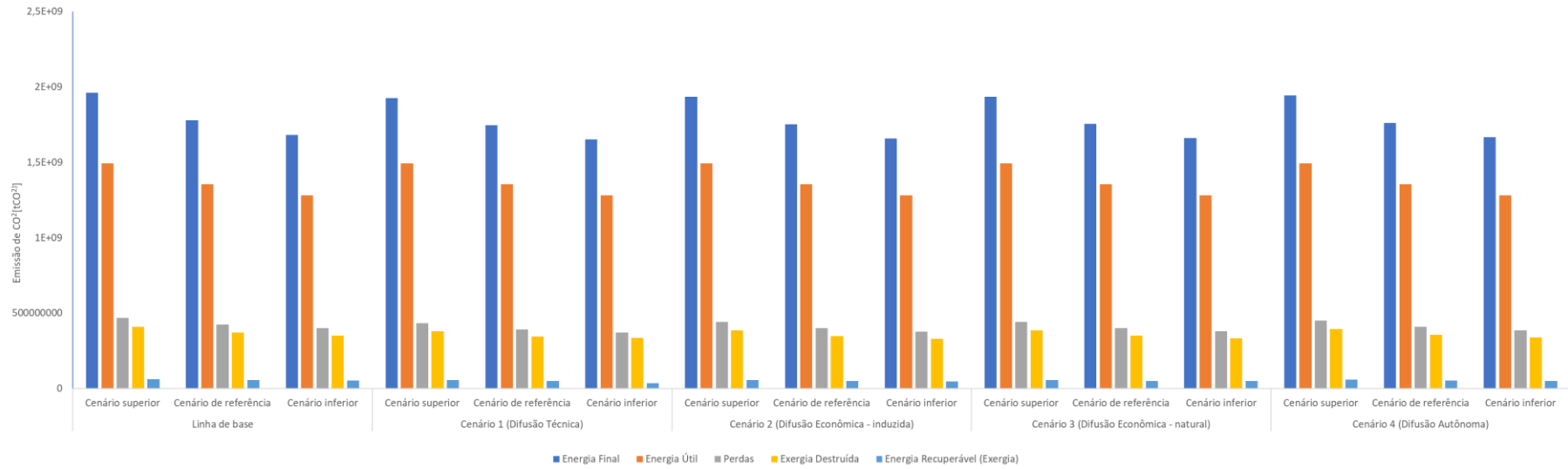


Figura 38 - Resultados gerais em termo de emissões para todos os segmentos industriais estudados e para todos os energéticos



Para aprofundar a análise, os resultados foram filtrados para o cenário de macroeconômico de referência e para o cenário de difusão tecnológica econômica-natural. Apresentando assim, os resultados indicados no gráfico de Pareto da Figura 39.

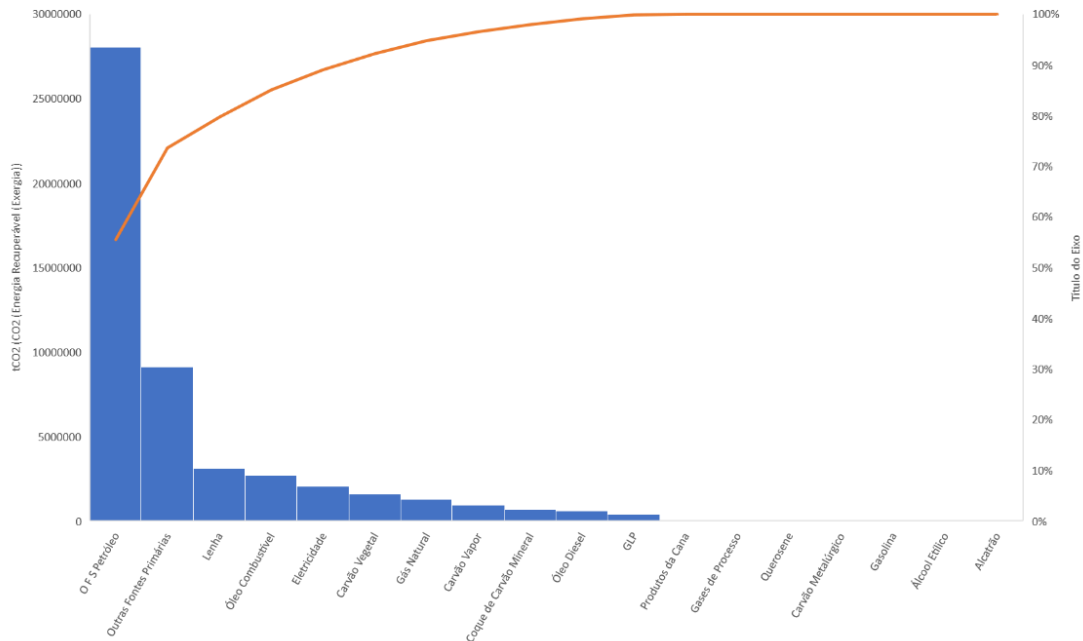


Figura 39 – Diagrama de Pareto para a emissão de CO_{2eq} evitada devido a energia recuperável considerando todos os segmentos industriais analisados

Comparando os resultados gráficos da Figura 36 com os da Figura 39, observa-se que apesar da energia recuperável ser maior para o coque de carvão mineral, a quantidade de emissões de CO_{2eq} evitado é maior para OFS Petróleo, naturalmente devido ao fator de emissão deste último combustível ser substancialmente maior do que o primeiro. Apesar da explicação simplista, este resultado é interessante para definição de políticas públicas, uma vez que se pode fazer a priorização pelo uso racional de determinado energético ou pelas emissões.

Finalmente, o gráfico da Figura 40 apresenta os resultados gerais em termos de emissão para todos segmentos industriais, mas específico para o OFS Petróleo, que foi o energético mais representativo em termos de CO_{2eq} evitado devido a recuperação das perdas energéticas.



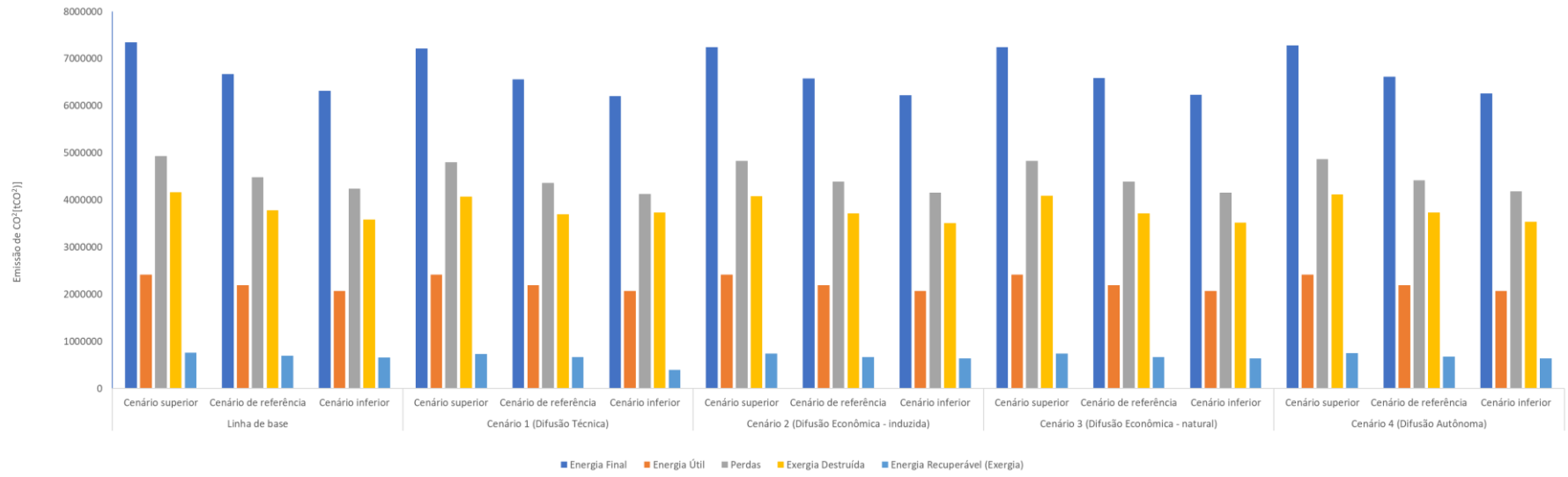


Figura 40 - Resultados gerais para todos os segmentos industriais estudados e específico para OFS Petróleo.



5.5 Validação dos resultados

Em relação a validação dos resultados obtidos, Figura 41 a Figura 49 , apresentam os gráficos para os energéticos térmicos, para os diferentes segmentos industriais. Observa-se que o comportamento dos resultados é similar ao encontrado para o segmento de Papel & Celulose. As exceções são o segmento de Alimentos e Bebidas e o segmento de Cerâmica e Vidro.

Em relação ao primeiro, o resultado em termos de desperdício de energia evitado, de fato, é superior ao apontado no estudo MME & EPE (2020), porém, deve-se lembrar que o horizonte temporal é diferente. Neste caso, para uma comparação justa, projetando os resultados para 2050 constata-se que eles são substancialmente mais otimistas que o projetado pela metodologia *Bottom-up* e *Top-down*.

Os resultados comparativos apresentados a seguir demonstram claramente que o estudo MME & EPE (2020) foi substancialmente otimista quando comparado com o presente trabalho. Neste aspecto, deve-se destacar que especificamente para o segmento de Cerâmica e Vidro os resultados foram ainda mais otimistas, conforme pode ser visualizado na Figura 49.

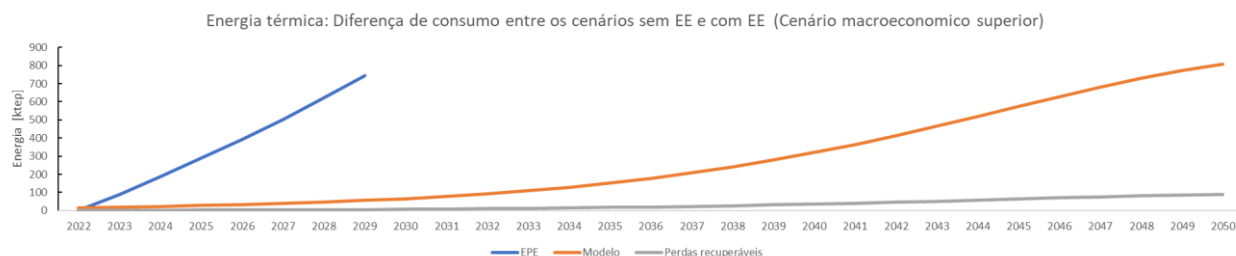


Figura 41 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Celulose & Papel.

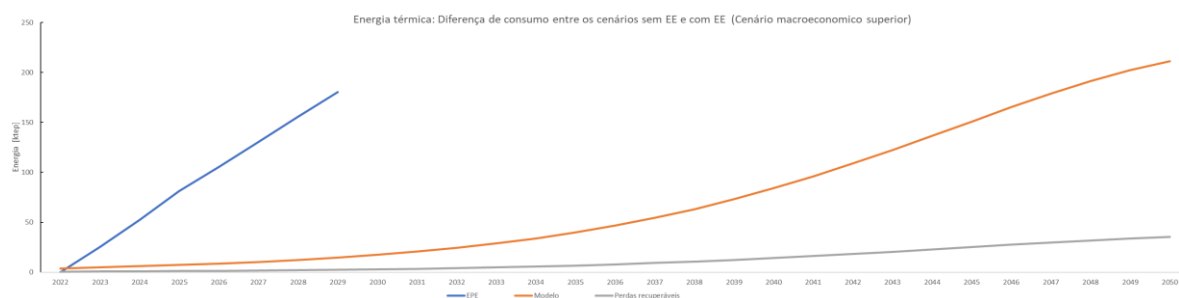


Figura 42 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Não Ferrosos.



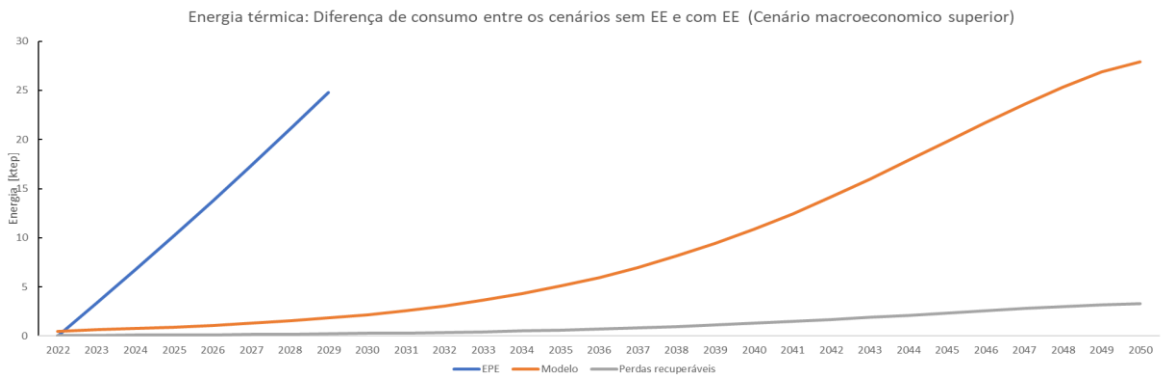


Figura 43 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento Têxtil.

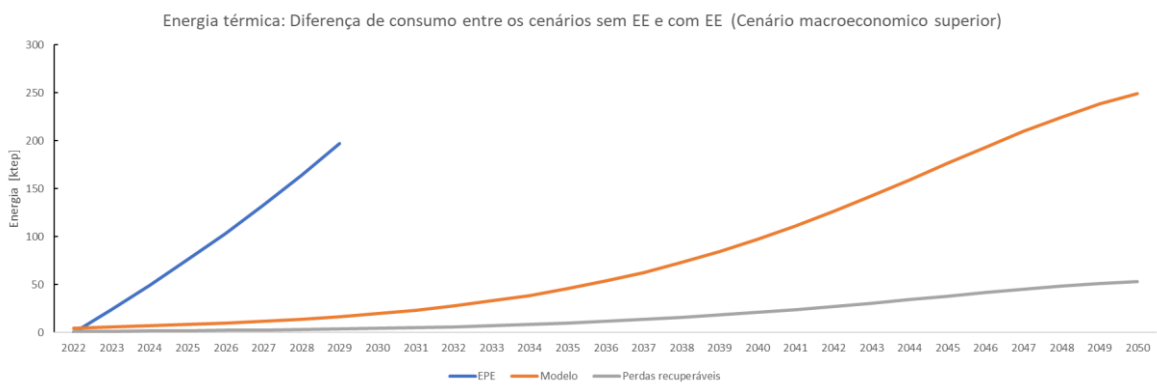


Figura 44 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Cimento.

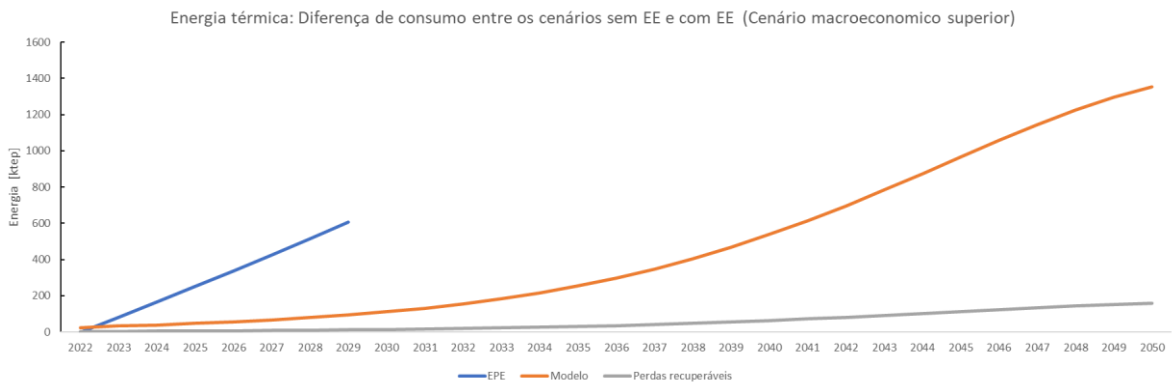


Figura 45 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Alimentos e Bebidas.



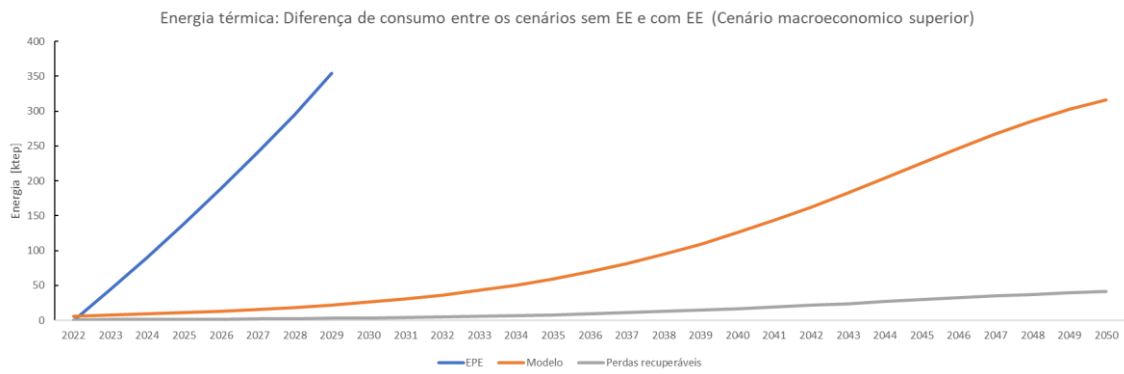


Figura 46 - - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento Químico.

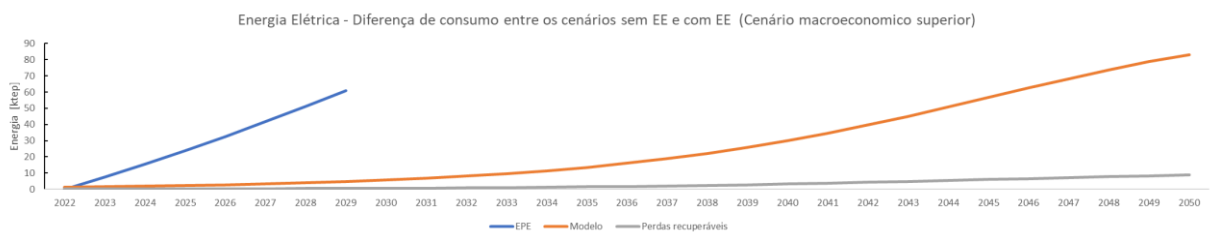


Figura 47 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Mineração e Pelotização.

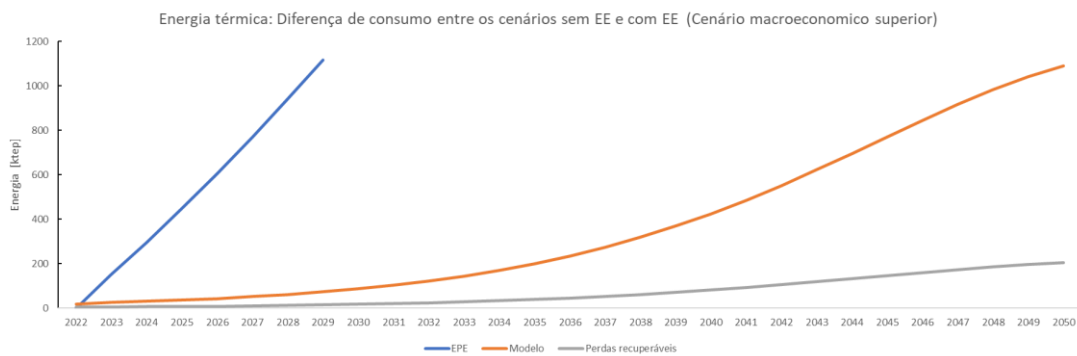


Figura 48 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Ferro Gusa e Aço.

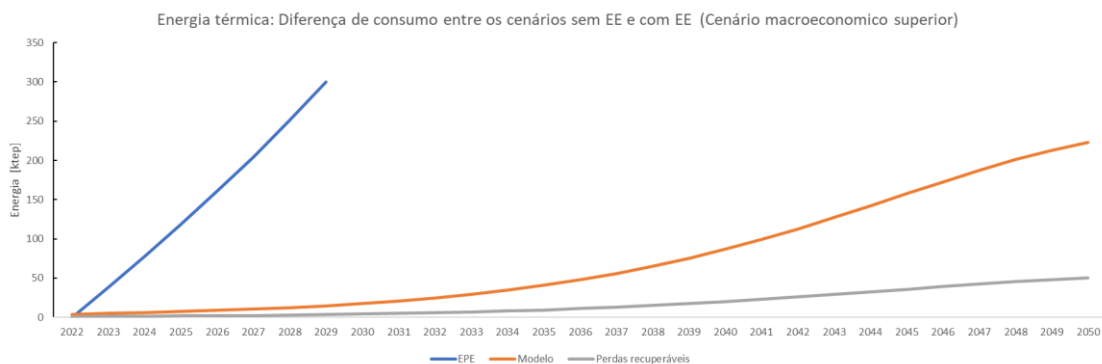


Figura 49 – Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para os energéticos térmicos e específico para o segmento de Cerâmica e Vidro.



No que concerne a energia elétrica, os resultados comparativos estão apresentados na Figura 50 a Figura 58. Novamente, em termos de ordem de grandeza do desperdício de energia evitado projetado para 2029 no estudo MME & EPE (2020) está majoritariamente na mesma ordem de grandeza do projetado para 2050 neste trabalho. Portanto, novamente observa-se que o presente estudo foi otimista frente à ótica do planejador. Em termos de exceção têm-se: Não Ferrosos; Têxtil; Cimento e Alimentos e Bebidas.

Quanto aos três primeiros, observa-se que projetando para 2050 o desperdício de energia evitado, segundo a ótica do planejador, será superior ao apontado no presente trabalho. Indicando assim, mais uma vez, o princípio do conservadorismo da modelagem *Bottom-up* e *Top-down*.

Em relação ao conservadorismo, a única exceção é o segmento de Alimentos e Bebidas. Pode-se constatar pela Figura 54 que de fato o desperdício de energia evitado projetado no horizonte temporal de 2022 a 2050 é superior ao indicado no estudo MME & EPE (2020), isso mesmo fazendo a projeção de 2029 para 2050, conforme mencionado anteriormente para outros segmentos industriais.

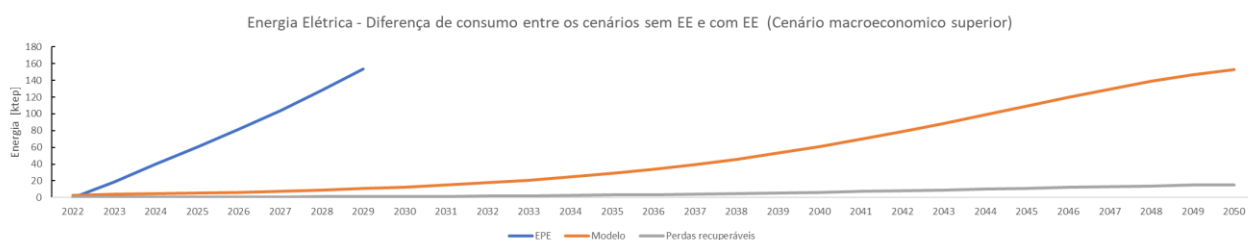


Figura 50 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Celulose & Papel.

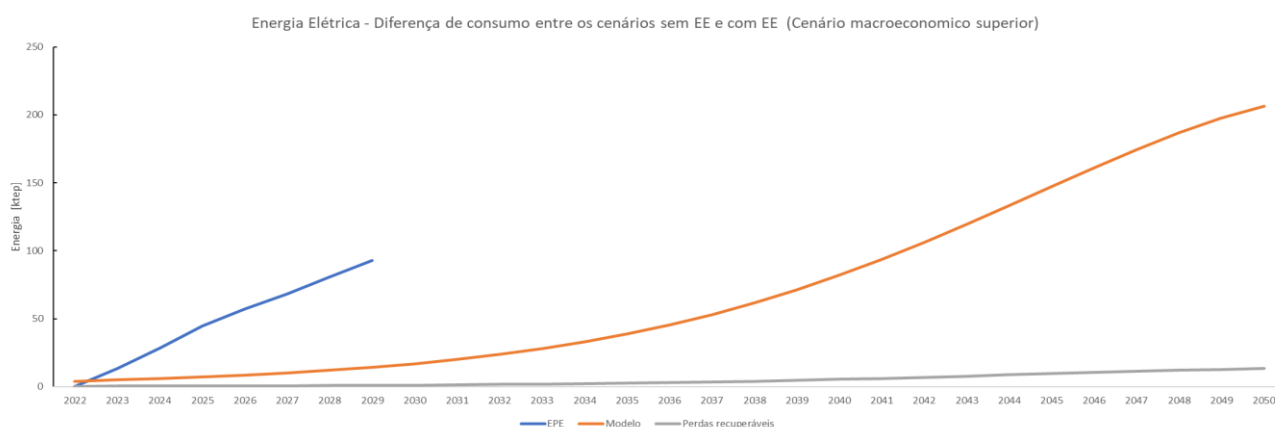


Figura 51 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Não Ferrosos.



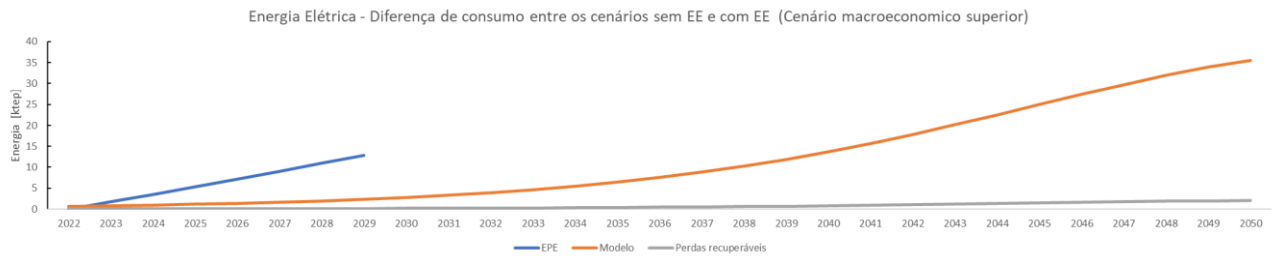


Figura 52 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento Têxtil.

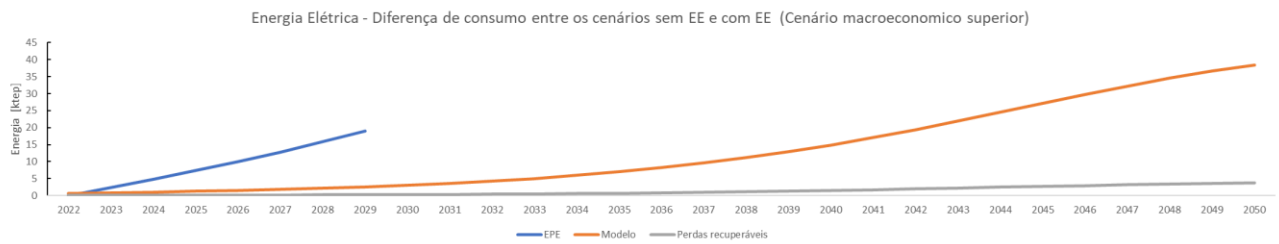


Figura 53 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Cimentos.

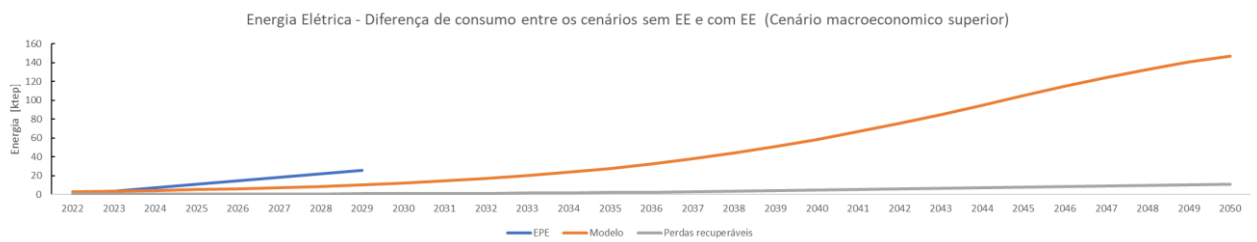


Figura 54 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Alimentos e Bebidas.

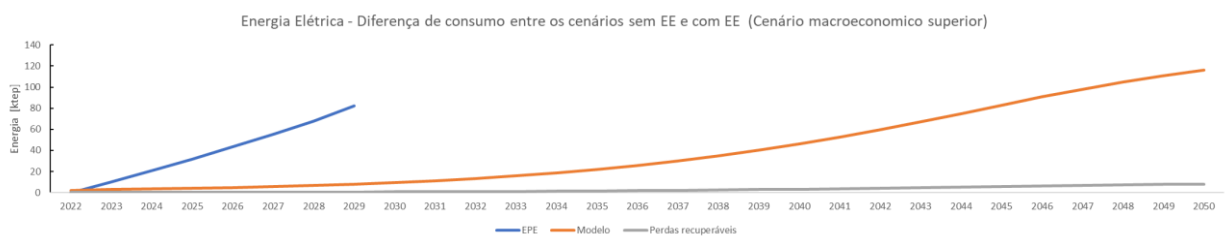


Figura 55 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento Químico.

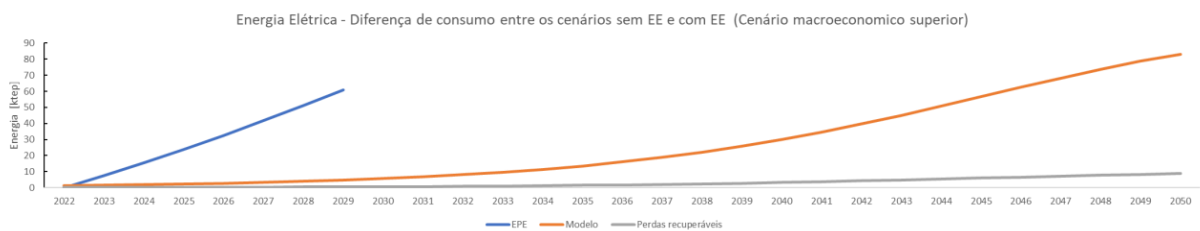


Figura 56 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Mineração e Pelotização.



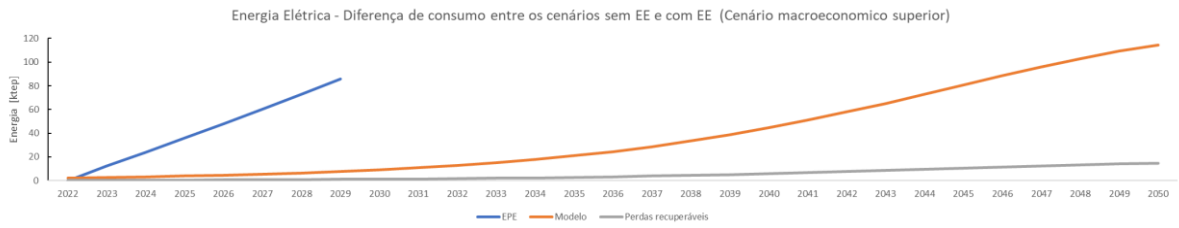


Figura 57 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Ferro Gusa e Aço.

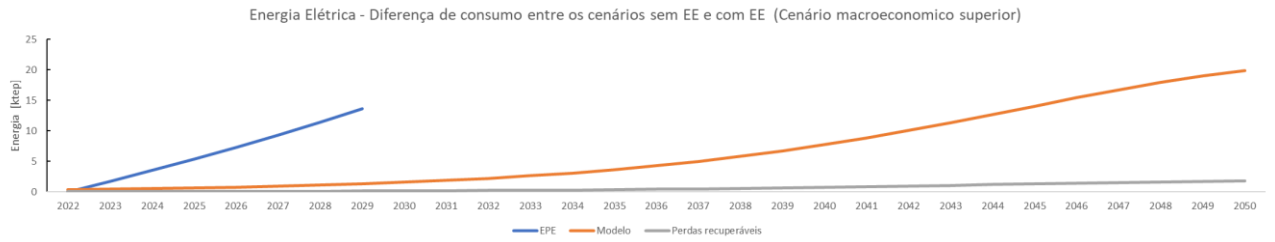


Figura 58 - Resultados comparativos entre a modelagem atual e a realizada pelo MME & EPE (2020) para energia elétrica e específico para o segmento de Cerâmica e Vidro



5.6 Mapa interativo

Conforme comentado neste relatório, a combinação de cenários adotada neste estudo é consideravelmente elevada. Sendo assim, a forma mais adequada de apresentar os resultados finais é realmente por meio de uma forma interativa, conforme previsto no Termo de Referência. Deste modo, foi desenvolvido um mapa interativo para que o usuário final faça a análise de acordo com o objetivo pretendido por ele, disponível no site do programa PotencializEE ([PotencializEE - Programa Investimentos Transformadores de Eficiência Energética na Indústria \(programa-potencializee.com.br\)](http://PotencializEE - Programa Investimentos Transformadores de Eficiência Energética na Indústria (programa-potencializee.com.br))).

Com vistas a compreender os efeitos das medidas de eficiência energética no setor industrial brasileiro considerando as especificidades regionais, torna-se necessária a desagregação da produção industrial em nível estadual. Ressalta-se que esta abertura da produção industrial é uma pré-condição para a implantação do mapa interativo que possibilitará ao analista avaliações com maior granularidade espacial.

Logo, é notória a necessidade da adoção de critérios com aptidão para a realização desta segmentação espacial em bases claras e objetivas. Dado que o estudo contempla indústrias que apresentam produções físicas mensuradas em diferentes métricas, uma primeira ponderação é o cuidado com a unidade a ser considerado. Concomitantemente, é preciso que a seleção da base de dados seja criteriosa e não resulte em incoerências metodológicas.

Nestas bases, optou-se por trabalhar com a Produção Industrial Anual (PIA) publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Esta publicação apresenta a produção da indústria brasileira aberta por estado. Por ser a versão disponível mais recente, a opção foi trabalhar com os dados da PIA de 2020.

Basicamente, se pegou dados estaduais de cada indústria e se dividiu pelo total nacional com o objetivo de se obter a participação em nível estadual nas indústrias em nível nacional. Em função da necessidade de se comparar, agregar e desagregar produções industriais de diferentes naturezas, se trabalhou com dados monetários em detrimento à alternativa de fazer a proporcionalização do tamanho das indústrias em nível estadual a partir dos dados da produção industrial.

Apesar dos dados da PIA possibilitarem uma primeira desagregação das indústrias em nível estadual, a metodologia ainda exigiu um refinamento dos resultados. Em linhas gerais, a problemática advém do fato que algumas indústrias apresentaram uma participação muito elevada da categoria “outros¹⁴”. Este resultado advém de uma premissa metodológica do IBGE de não apresentar a produção industrial de estados em que um reduzido número de

¹⁴ Na categoria “outros” o IBGE considera as indústrias que não tiveram um estado associado. Tem-se, portanto o percentual de participação de cada estado mais a categoria “outros” para se somar os 100% do Brasil.



empresas respondeu à pesquisa. A lógica desta abordagem é não explicitar dados de empresas específicas.

Para efeito de dimensionamento das implicações desta limitação metodológica da PIA, a participação da categoria “outros” no setor de cimentos foi de 26,5% enquanto no setor de metais não ferrosos foi de 37,7%. Ainda mais problemáticos foram os resultados para os setores de ferro gusa e aço e de mineração e pelotização onde a categoria outros apresentou uma participação de, respectivamente, 45,5% e 52%.

Dada a necessidade de reduzir a participação da categoria “outros”, foram processados documentos de entidades setoriais que abordavam a produção e o faturamento das indústrias. Com exceção dos segmentos de metais não ferrosos e de ferro gusa e aço onde se deparou com carência de dados capazes de permitir avanços na desagregação espacial da indústria brasileira, esta busca por dados complementares se mostrou exitosa.

Como ilustração, a categoria “outros” passou a representar apenas 7% da indústria de mineração e pelotização. No caso da indústria de cimento, utilizando-se dados da produção física, foi possível obter a desagregação em nível estadual completa e a categoria “outras” se tornou residual. Os resultados desta desagregação são apresentados de forma resumida na tabela 13 a seguir.



Tabela 13 – Desagregação da indústria por estado (%)

Estado	Alimentos e bebidas	Cerâmica e Vidro	Cimento *	Ferro Gusa e Aço	Metais não ferrosos	Mineração e Pelotização	Papel e Celulose	Química	Têxtil
Acre	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
Alagoas	0,6%	0,0%	0,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,4%
Amapá	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
Amazonas	0,2%	0,0%	1,4%	1,0%	0,0%	0,0%	1,5%	0,6%	0,1%
Bahia	3,4%	4,5%	2,4%	0,1%	0,0%	2,9%	9,7%	6,8%	2,1%
Ceará	1,4%	2,9%	4,6%	3,6%	0,0%	0,0%	2,9%	0,3%	5,0%
Distrito Federal	0,0%	0,0%	5,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
Espírito Santo	0,3%	0,0%	1,3%	1,5%	0,1%	0,0%	0,0%	0,3%	1,8%
Goiás	7,3%	0,0%	3,7%	0,2%	0,1%	3,2%	1,3%	4,3%	5,6%
Maranhão	0,3%	0,0%	0,6%	0,0%	8,7%	0,0%	0,0%	1,3%	0,4%
Mato Grosso	8,5%	0,0%	2,3%	0,0%	0,0%	2,4%	0,0%	3,6%	0,7%
Mato Grosso do Sul	4,6%	0,0%	1,5%	1,7%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%	0,6%
Minas Gerais	9,6%	0,0%	25,9%	39,5%	10,9%	39,2%	3,6%	8,4%	12,4%
Pará	2,0%	0,0%	1,4%	1,5%	25,2%	49,8%	0,0%	0,0%	0,4%
Paraíba	0,0%	0,0%	6,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,8%
Paraná	11,9%	0,0%	12,2%	0,9%	0,9%	0,0%	6,7%	8,1%	8,2%
Pernambuco	1,7%	1,6%	0,7%	0,3%	0,0%	0,0%	0,5%	0,8%	4,6%
Piauí	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,6%
Rio de Janeiro	2,9%	0,0%	4,9%	26,0%	4,8%	0,0%	4,0%	4,2%	5,6%
Rio Grande do Norte	0,1%	0,0%	2,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	1,1%
Rio Grande do Sul	9,5%	0,0%	2,8%	2,8%	0,6%	0,0%	7,8%	10,7%	5,0%
Rondônia	2,2%	0,1%	0,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,3%
Roraima	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
Santa Catarina	7,6%	31,0%	3,4%	10,4%	0,1%	0,0%	11,5%	1,7%	17,1%
São Paulo	24,9%	59,8%	11,7%	10,5%	48,5%	2,4%	50,6%	48,0%	25,9%
Sergipe	0,0%	0,0%	3,4%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,6%
Tocantins	0,8%	0,0%	1,2%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%
Total Geral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

* Dados da indústria de cimento calculados com base na proporção da produção em toneladas



Por meio do mapa interativo o usuário poderá fazer diferentes filtros, o que inevitavelmente o auxiliará no estabelecimento de políticas públicas. Por exemplo, caso o usuário escolha o mapa interativo de “Perdas Recuperáveis”, para um determinado cenário macroeconômico; de difusão tecnológica; para um energético específico e para um uso final específico ele terá em mãos os valores das perdas distribuídas por estado, sendo assim útil no direcionamento dos esforços regionais seja para determinação de políticas públicas, seja para o investimento de uma determinada indústria ou ESCO. A Figura 60 apresenta a interface gráfica criada para o Mapa Interativo do projeto

Para adequado entendimento, foi feito no Apêndice D um tutorial para que o usuário tome ciência das diversas possibilidades de análise que o mapa interativo oferece.



Mapa Interativo
 Energia Útil [ktep]

 Cenário Macroeconômico
 Cenário de referência

 Cenário Difusão Tecnológica
 Cenário 1 (Difusão Técnica)

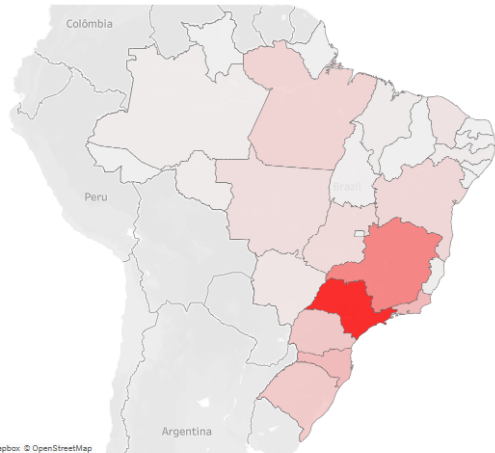
 Ano
 2022 2050

 Segmento Industrial
 (Tudo)

 Energético
 (Tudo)

 Uso Final
 (Tudo)

 Estado
 (Tudo)

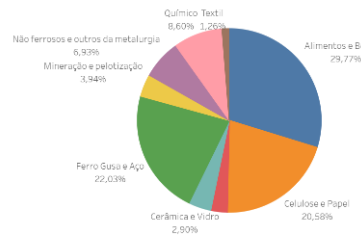


© 2023 Mapbox © OpenStreetMap

Estado	Energia Útil (ktep)	Energia Final (ktep)	Perdas (ktep)	Energia Destruída (ktep)	Perdas Recuperáveis (ktep)	CO2 (Energia Útil)	CO2 (Energia Final)	CO2 (Perdas)	CO2 (Energia Destruída)	CO2 (Energia Recuperável (Exergia))
Acre	25.220	30.240	5.019	4.722	0.297	12.846	15.403	2.557	2.405	0.151
Alagoas	4.216.899	5.490.042	1.273.183	1.132.222	140.961	2.147.945	2.796.467	648.523	576.721	71.802
Amapá	25.220	30.240	5.019	4.722	0.297	12.846	15.403	2.557	2.405	0.151
Amazonas	13.988.149	17.542.172	3.554.023	3.097.752	456.271	7.125.155	8.935.471	1.810.316	1.577.905	232.411
Bahia	70.772.455	98.302.500	18.620.045	16.576.272	2.043.773	40.633.763	50.118.271	9.484.508	8.443.470	1.041.038
Ceará	43.770.447	57.082.396	13.302.049	11.946.379	1.355.717	22.259.974	29.076.108	6.776.135	5.881.389	894.746
Distrito Federal	140.110	180.219	40.109	30.389	9.720	71.424	11.798	17.274	15.785	1.589
Espírito Santo	11.116.646	14.694.928	3.578.282	3.090.690	487.592	5.651.477	7.483.117	1.831.640	1.571.302	210.338
Goiás	63.827.865	80.479.518	16.651.653	14.914.221	1.737.433	32.512.053	40.993.920	8.481.867	7.596.860	884.998
Maranhão	16.969.932	24.192.942	7.203.010	6.528.174	674.845	8.654.171	12.323.179	3.669.008	3.325.261	343.747
Mato Grosso	60.520.201	76.179.484	15.659.283	14.077.547	1.581.735	30.827.226	38.803.608	7.976.382	7.170.692	805.690

Mapa Interativo

Segmento Industrial



Energético

Produtos da Cadeia	20,09%	Cocao de Carvão Mineral	10,09%	Gás Natural	8,51%
Importado	10,11%	Lenha	7,36%	Óleo Petróleo	6,85%
Outras Fontes Primárias	11,73%	Carvão Vegetal			

Evolução Anual por Uso Final [ktep]

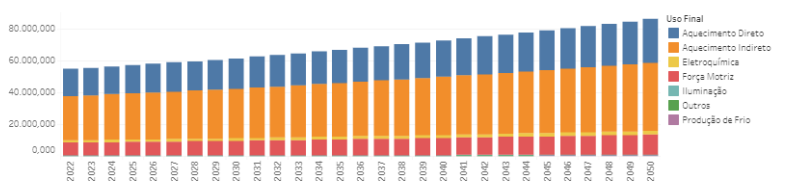


Figura 59 – Mapa interativo

6. Conclusão

Conforme identificado no (BEN, 2022), o segmento industrial é o mais representativo em termos de consumo de energia, tanto elétrica quanto térmica. Do ponto de vista de eficiência energética, o maior potencial de evitar o desperdício de energia está nos sistemas térmicos, conforme indica o estudo (Eletrobras/CNI, 2010), fato que justifica o empenho da GIZ em propor políticas públicas específicas para a eficiência energética em sistemas térmicos industriais.

As abordagens *bottom-up* e *top-down* tem sido utilizada para análise e previsão do consumo de energia de longo prazo, considerando os cenários de eficiência energética. Portanto, neste projeto, foi desenvolvida uma metodologia através das abordagens *bottom-up* e *top-down* que combina as curvas de difusão tecnológica com o potencial de economia de energia térmica do setor industrial.

Tendo em vista que os energéticos no setor industrial são tanto de origem elétrica quanto térmica, a diferença entre as qualidades dessas formas de energia não permite que elas sejam somadas de forma tecnicamente consistente. Neste sentido, no âmbito deste trabalho foi realizada uma análise do ponto de vista energética, mas principalmente exergética.

O ponto de partida deste trabalho foi o BEU desenvolvido no âmbito do PDEf, no qual foi proposto um aperfeiçoamento metodológico. A proposta é fazer a qualificação dos fluxos de energia de acordo a sua qualidade (avaliada em função de sua capacidade de conversão eficiente em diferentes formas de energia) e permitindo identificar melhor tanto as perdas reais de energia nas conversões energéticas assim como as possibilidades de incremento da eficiência nos processos finais de conversão junto nos segmentos industriais.

Além de se fazer essa análise do ponto de vista exergético, para subsidiar a elaboração das referidas políticas públicas, torna-se necessário além de quantificar o potencial técnico, determinar também os potenciais tanto econômico quanto induzido para que eles possam ser comparados com o cenário livre de qualquer interferência, seja tecnológica ou devido a algum efeito da política pública. Por meio da análise desses cenários é possível estimar o efeito das difusões tecnológicas no horizonte temporal.

Os cenários de difusão tecnológica são criados com base nas curvas de difusão, que por sua vez dependem de uma série de parâmetros. Neste ponto, percebeu-se uma limitação de dados para definição dos parâmetros da curva de difusão. Essas curvas foram ajustadas e

calibradas levando em conta o cenário do rendimento do uso final proposto no PDEf para o ano de 2029 no final do horizonte estudado. Ademais, de forma indireta as curvas também foram analisadas qualitativamente com base nos resultados encontrados no âmbito do MME & EPE (2020).

Torna-se oportuno destacar que esses parâmetros resultam de discussões com especialistas dos segmentos industriais, fornecedores de tecnologia e institutos de pesquisa. Desta forma, há claramente um grau substancial de incerteza. Frequentemente, apenas informações qualitativas estão disponíveis.

Naturalmente como a proposta é analisar o horizonte até 2050, torna-se imprescindível uma análise de cenários macroeconômicos, pois é a partir da projeção do PIB, que é possível projetar a produção setorial e conseqüentemente o consumo energético de determinado segmento. Para tanto, uma análise de regressão de dados históricos entre PIB e Produção setorial e entre Produção setorial e o consumo energético setorial foi também realizada.

Após a implementação computacional de toda a modelagem aqui descrita foi possível fazer uma análise aprofundada em termos de eficiência energética dos segmentos industriais aqui abordados. Novamente, a título de exemplo, foi apresentado alguns resultados do segmento de Papel e Celulose e, posteriormente, para todos os demais segmentos industriais.

Com o resultado consolidado para indústria brasileira, verificou-se um grande potencial energia recuperável para os seguintes energéticos: Coque de Carvão Mineral; O. F. S. de Petróleo; Lenha; e Produtos da Cana. Apesar da energia recuperável ser maior para o Coque de Carvão Mineral, a quantidade de emissões de CO₂e evitado é maior para O. F. S. Petróleo, naturalmente devido ao fator de emissão deste último combustível ser substancialmente maior do que o primeiro. Apesar da explicação simplista, este resultado é interessante para definição de políticas públicas, uma vez que se pode fazer a priorização pelo uso racional de determinado energético ou pelas emissões.

Em relação a validação dos resultados, pode-se dizer que esta foi bem-sucedida, uma vez que os valores estimados do potencial de eficiência energética na indústria pelo modelo Bottom-up/Top-down desenvolvido neste projeto estão dentro da ordem grandeza dos valores estimados pelo MME e EPE (2020). Percebeu-se que as estimativas do Governo e do planejador são bem mais otimistas, o que era de se esperar, pois estes têm uma visão otimista do crescimento da economia.

Com vistas a facilitar a visualização destes resultados foi construído um mapa interativo que permite que o usuário possa fazer diferentes análises, o que inevitavelmente o auxiliará no estabelecimento de política públicas e direcionar os investimentos de uma determinada indústria ou ESCO. Este mapa poderá ser disponibilizado *on-line* no site do PotencializEE, tendo sido criada uma rotina para fazê-lo. Além disso, um mini tutorial para utilização do mapa foi disponibilizado neste relatório (Apêndice D).

Esta publicação tem-se como principal resultado apresentar a quantidade de energia recuperável. A partir de agora, torna-se possível especificar as tecnologias atualmente existentes capazes de fazer com que a energia recuperável, se torne de fato energia útil. Nestes termos, será possível por meio de premissas e de análises qualitativas estimar a energia recuperável devido a inclusão no mercado de tecnologias presentes no Catálogo do PotencializEE.

No próximo capítulo, serão avaliadas as políticas que possam aumentar a eficiência térmica da indústria. Também serão avaliadas as tecnologias que podem impulsionar esta eficiência, sendo estas relacionadas a políticas públicas (*rebate* de equipamentos, por exemplo). O modelo Bottom-up/Top-down permite avaliar o potencial destas políticas públicas ('valor cenário de difusão econômica dinâmica induzida' - 'valor cenário de difusão econômica dinâmica natural'), sendo mensurado por cenário macroeconômico segmento e uso final. Isto possibilita apresentar aos tomadores de decisão o potencial de eficiência energética por meio da avaliação dos impactos quantitativos destas políticas (inclusive política de troca de equipamentos).

Ainda, é interessante avaliar como um programa tão relevante como o PEE pode ser ampliado de maneira a considerar projetos que considerem aumento da eficiência térmica em processos industriais. Ademais destaca-se a importância do fortalecimento do CONPET como política pública também para os energéticos. Enfim, com base nos resultados aqui apresentados será possível a melhor calibração de políticas públicas direcionando adequadamente o foco de atuação.

Apêndices

Apêndice A – Cenários macroeconômicos

Cenário de Referência

Tabela A1- Cenário de referência do PIB da Indústria

	EXTRATIVA MINERAL	TRANSFOR MAÇÃO	NÃO METÁLICOS	METALURGIA	QUÍMICA	ALIMENTOS E BEBIDAS	TÊXTIL	PAPEL E CELULOSE	OUTRAS
2021	28.139	445.576	12.834	32.908	16.671	50.450	5.422	12.054	315.236
2022	28.702	452.260	13.014	33.369	16.905	51.156	5.509	12.223	320.280
2023	29.276	459.044	13.196	33.836	17.141	51.872	5.597	12.394	325.404
2024	29.862	465.929	13.381	34.310	17.381	52.598	5.686	12.568	330.611
2025	30.459	472.918	13.568	34.790	17.624	53.335	5.777	12.744	335.901
2026	31.068	480.012	13.758	35.277	17.871	54.081	5.870	12.922	341.275
2027	31.689	487.212	13.951	35.771	18.121	54.839	5.964	13.103	346.735
2028	32.323	494.520	14.146	36.272	18.375	55.606	6.059	13.287	352.283
2029	32.970	501.938	14.344	36.780	18.632	56.385	6.156	13.473	357.920
2030	33.629	509.467	14.545	37.295	18.893	57.174	6.255	13.661	363.647
2031	34.470	518.638	14.778	37.892	19.196	58.089	6.380	13.880	370.919
2032	35.331	527.973	15.014	38.498	19.503	59.018	6.507	14.102	378.338
2033	36.215	537.477	15.255	39.114	19.815	59.963	6.637	14.327	385.905
2034	37.120	547.151	15.499	39.740	20.132	60.922	6.770	14.557	393.623
2035	38.048	557.000	15.747	40.375	20.454	61.897	6.906	14.790	401.495
2036	38.999	567.026	15.999	41.021	20.781	62.887	7.044	15.026	409.525
2037	39.974	577.233	16.254	41.678	21.114	63.893	7.185	15.267	417.716
2038	40.974	587.623	16.515	42.345	21.451	64.916	7.328	15.511	426.070
2039	41.998	598.200	16.779	43.022	21.795	65.954	7.475	15.759	434.591
2040	43.048	608.968	17.047	43.711	22.143	67.010	7.624	16.011	443.283
2041	44.124	619.929	17.320	44.410	22.498	68.082	7.777	16.267	452.149
2042	45.227	631.088	17.597	45.120	22.858	69.171	7.932	16.528	461.192
2043	46.358	642.447	17.879	45.842	23.223	70.278	8.091	16.792	470.416
2044	47.517	654.011	18.165	46.576	23.595	71.402	8.253	17.061	479.824
2045	48.705	665.783	18.455	47.321	23.972	72.545	8.418	17.334	489.420
2046	49.922	677.768	18.751	48.078	24.356	73.705	8.586	17.611	499.209
2047	51.170	689.967	19.051	48.847	24.746	74.885	8.758	17.893	509.193
2048	52.450	702.387	19.355	49.629	25.142	76.083	8.933	18.179	519.377
2049	53.761	715.030	19.665	50.423	25.544	77.300	9.112	18.470	529.764
2050	55.105	727.900	19.980	51.230	25.953	78.537	9.294	18.766	540.360

Cenário Superior

Tabela A2- Cenário superior do PIB da Indústria

	EXTRATIVA MINERAL	TRANSFOR MAÇÃO	NÃO METÁLICOS	METALURGIA	QUÍMICA	ALIMENTOS E BEBIDAS	TÊXTIL	PAPEL E CELULOSE	OUTRAS
2021	28.139	445.576	12.834	32.908	16.671	50.450	5.422	12.054	315.236
2022	28.983	455.379	13.091	33.567	17.005	51.459	5.547	12.295	322.487
2023	29.853	465.397	13.353	34.238	17.345	52.488	5.674	12.541	329.904
2024	30.748	475.636	13.620	34.923	17.692	53.538	5.805	12.792	337.492
2025	31.671	486.100	13.892	35.621	18.045	54.608	5.938	13.048	345.254
2026	32.621	496.794	14.170	36.334	18.406	55.701	6.075	13.309	353.195
2027	33.600	507.724	14.454	37.060	18.774	56.815	6.215	13.575	361.318
2028	34.608	518.894	14.743	37.801	19.150	57.951	6.357	13.847	369.629
2029	35.646	530.309	15.038	38.557	19.533	59.110	6.504	14.124	378.130
2030	36.715	541.976	15.338	39.329	19.924	60.292	6.653	14.406	386.827
2031	37.890	554.983	15.676	40.194	20.362	61.619	6.820	14.723	396.498
2032	39.103	568.303	16.021	41.078	20.810	62.974	6.990	15.047	406.410
2033	40.354	581.942	16.373	41.982	21.268	64.360	7.165	15.378	416.570
2034	41.645	595.909	16.733	42.905	21.736	65.775	7.344	15.716	426.985
2035	42.978	610.211	17.101	43.849	22.214	67.223	7.528	16.062	437.659
2036	44.353	624.856	17.478	44.814	22.702	68.701	7.716	16.415	448.601
2037	45.773	639.852	17.862	45.800	23.202	70.213	7.909	16.777	459.816
2038	47.237	655.209	18.255	46.808	23.712	71.758	8.106	17.146	471.311
2039	48.749	670.934	18.657	47.837	24.234	73.336	8.309	17.523	483.094
2040	50.309	687.036	19.067	48.890	24.767	74.950	8.517	17.908	495.171
2041	51.919	703.525	19.487	49.965	25.312	76.598	8.730	18.302	507.551
2042	53.580	720.410	19.915	51.065	25.869	78.284	8.948	18.705	520.239
2043	55.295	737.699	20.353	52.188	26.438	80.006	9.172	19.117	533.245
2044	57.064	755.404	20.801	53.336	27.020	81.766	9.401	19.537	546.576
2045	58.890	773.534	21.259	54.509	27.614	83.565	9.636	19.967	560.241
2046	60.775	792.099	21.727	55.709	28.222	85.403	9.877	20.406	574.247
2047	62.719	811.109	22.205	56.934	28.842	87.282	10.124	20.855	588.603
2048	64.726	830.576	22.693	58.187	29.477	89.202	10.377	21.314	603.318
2049	66.798	850.510	23.192	59.467	30.125	91.165	10.636	21.783	618.401
2050	68.935	870.922	23.703	60.775	30.788	93.170	10.902	22.262	633.861

Cenário Inferior

Tabela A3 - Cenário inferior do PIB da Indústria

	EXTRATIVA MINERAL	TRANSFOR MAÇÃO	NÃO METÁLICOS	METALURGIA	QUÍMICA	ALIMENTOS E BEBIDAS	TÊXTIL	PAPEL E CELULOSE	OUTRAS
2021	28.139	445.576	12.834	32.908	16.671	50.450	5.422	12.054	315.236
2022	28.364	450.032	12.937	33.172	16.804	50.853	5.476	12.151	320.595
2023	28.591	454.532	13.041	33.437	16.939	51.260	5.531	12.248	323.801
2024	28.820	459.078	13.145	33.705	17.074	51.670	5.586	12.346	327.039
2025	29.051	463.668	13.250	33.974	17.211	52.084	5.642	12.445	330.310
2026	29.283	468.305	13.356	34.246	17.349	52.500	5.699	12.544	333.613
2027	29.517	472.988	13.463	34.520	17.488	52.920	5.756	12.645	336.949
2028	29.753	477.718	13.571	34.796	17.627	53.344	5.813	12.746	340.318
2029	29.991	482.495	13.679	35.074	17.768	53.770	5.871	12.848	343.721
2030	30.231	487.320	13.789	35.355	17.911	54.201	5.930	12.951	349.565
2031	30.685	495.117	13.995	35.885	18.179	55.014	6.031	13.145	355.507
2032	31.145	503.039	14.205	36.424	18.452	55.839	6.133	13.342	361.551
2033	31.612	511.088	14.418	36.970	18.729	56.676	6.237	13.542	367.697
2034	32.086	519.265	14.635	37.525	19.010	57.526	6.344	13.745	373.948
2035	32.568	527.573	14.854	38.087	19.295	58.389	6.451	13.951	380.305
2036	33.056	536.015	15.077	38.659	19.584	59.265	6.561	14.161	386.770
2037	33.552	544.591	15.303	39.239	19.878	60.154	6.673	14.373	393.346
2038	34.055	553.304	15.533	39.827	20.176	61.057	6.786	14.589	400.032
2039	34.566	562.157	15.766	40.425	20.479	61.972	6.901	14.808	406.833
2040	35.085	571.152	16.002	41.031	20.786	62.902	7.019	15.030	413.749
2041	35.611	580.290	16.242	41.646	21.098	63.845	7.138	15.255	420.783
2042	36.145	589.575	16.486	42.271	21.414	64.803	7.259	15.484	427.936
2043	36.687	599.008	16.733	42.905	21.735	65.775	7.383	15.716	435.211
2044	37.238	608.592	16.984	43.549	22.061	66.762	7.508	15.952	442.610
2045	37.796	618.329	17.239	44.202	22.392	67.763	7.636	16.191	450.134
2046	38.363	628.223	17.498	44.865	22.728	68.780	7.766	16.434	457.786
2047	38.939	638.274	17.760	45.538	23.069	69.811	7.898	16.681	465.569
2048	39.523	648.487	18.026	46.221	23.415	70.859	8.032	16.931	473.483
2049	40.115	658.862	18.297	46.914	23.766	71.921	8.169	17.185	481.533
2050	40.717	669.404	18.571	47.618	24.123	73.000	8.307	17.443	489.719

Apêndice B – Modelagem estatística e validação

Todo o trabalho desenvolvido no presente estudo tem como pilar a disponibilidade de dados e seu adequado tratamento. Neste sentido, cumpre destacar inicialmente que os resultados apresentados pela modelagem matemática passaram por uma profunda análise, tanto do ponto de vista físico quanto estatístico, fornecendo assim a robustez necessária para que os resultados possam ser amplamente utilizados como ferramenta de planejamento da eficiência energética térmica industrial no Brasil.

A título de exemplo, todos os casos apresentados nessa seção se referem ao setor industrial, segmento de Papel e Celulose e como energético o gás natural.

A ferramenta análise de regressão linear da estatística foi empregada inicialmente para obter uma relação entre o Produto Interno Bruto do segmento industrial de interesse e a produção do respectivo segmento. Neste sentido uma expressão matemática é obtida e correlaciona essas variáveis, conforme apresentado na figura B1.

A variável independente pode ser definida como um parâmetro que pode mudar regularmente e causar um impacto mensurável no consumo de energia industrial.

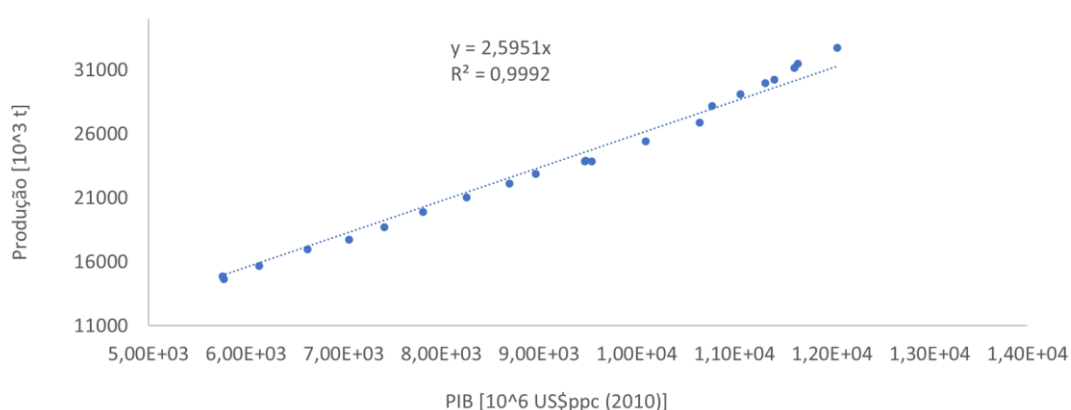


Figura B1 - Correlação entre PIB e Produção

Partindo da premissa de que energia usada nos processos industriais passa por uma série de transformações, como por exemplo aquecimento, resfriamento, alteração do estado físico,

dentre outras, é inviável avaliar o processo de uma forma genérica, considerando todas as variáveis independentes de influência, dado a complexidade e variabilidade das operações existentes

Entretanto, a relação entre a energia utilizada e a produção tende a apresentar um comportamento linear. Neste sentido, em geral, utiliza-se o consumo energético do segmento industrial como variável dependente e a produção como variável independente. Vale ressaltar que, caso necessário, outras variáveis independentes poderiam ser incluídas para melhorar a representatividade do modelo matemático construído, porém, como será observado, os resultados obtidos são satisfatórios e naturalmente o mais recomendável é trabalhar com modelos o mais simples possível.

A equação abaixo apresenta a relação que em geral é observada em processos produtivos. β_0 e β_1 são coeficientes empíricos, característicos do sistema em análise e referem-se, respectivamente, a inclinação e a interseção (quando a produção for igual a zero).

$$\text{Consumo}_{\text{Energético}} = (\beta_0 \times \text{produção}) + \beta_1 \quad (1)$$

Esta equação pode ser obtida a partir da identificação da relação funcional entre a variável dependente e independente. Esta relação pode ser determinada a partir de uma regressão linear, utilizando técnicas como mínimos quadrados para ajustar os coeficientes β_0 e β_1 visando minimizar a diferença entre o valor de $\text{Consumo}_{\text{Energético}}$ estimado pela equação e o valor real fornecido pelo histórico de dados.

A melhor representação do consumo de energia pode não ser univariável e linear, caso exista, por exemplo, uma dependência do consumo energético com outras variáveis independentes

além da produção. Nestes casos é necessário a construção de um modelo multivariável linear ou não-linear para representar de forma satisfatória a relação entre as variáveis dependentes

e independentes, considerando-se um modelo de regressão múltipla, que conforme comentado, não foi necessário no âmbito deste trabalho.

Uma segunda análise de regressão foi realizada cruzando as informações históricas de produção de determinado segmento industrial com o seu respectivo consumo de determinado energético. A figura B2 apresenta os resultados obtidos correlacionando o consumo de gás natural do segmento de Papel e Celulose com a produção deste segmento.

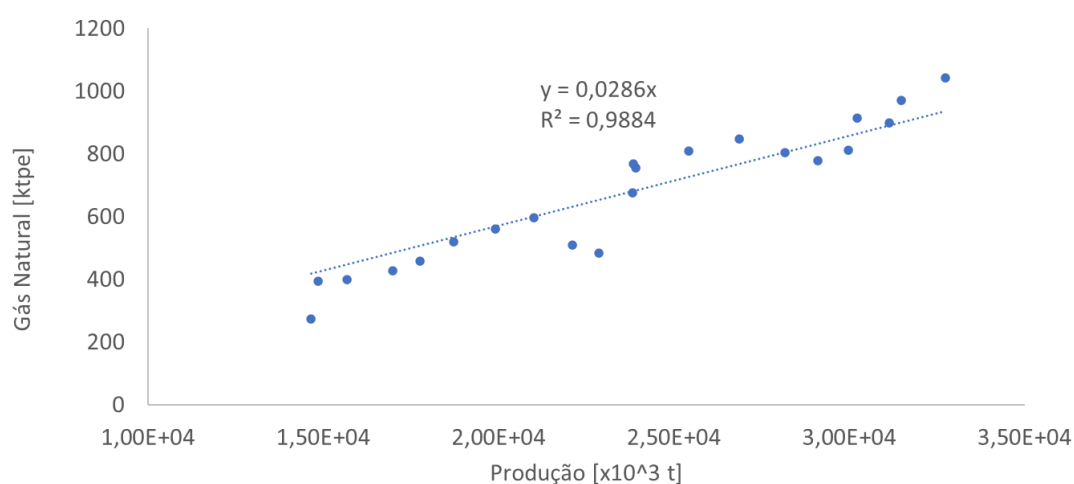


Figura B2 - Correlação entre Produção e Consumo energético setorial

Validação física do modelo

Quando se trabalha com análise de regressão, uma importante análise preliminar é a validação física do modelo. O significado físico dos parâmetros é essencial para uma compreensão de como a energia é consumida e como as eficiências de energia podem ser alcançadas a partir de ações de eficiência energética.

Em outras palavras, deve-se responder a seguinte pergunta: o modelo matemático encontrado tem sentido físico? No tocante a este aspecto, observa-se em ambos os gráficos,

Figuras 1 e 2, que os modelos têm sentido físico, ou seja, a tendência é que a medida que o PIB setorial cresce a produção do segmento acompanha esse crescimento. No que se refere ao segundo gráfico, observa-se um maior consumo de gás natural para produções mais elevadas do segmento.

Na validação física, a variação do consumo energético deve ser avaliada de forma qualitativa e quantitativa. A validação qualitativa tem o intuito de avaliar se as alterações nas variáveis independentes promovem um efeito esperado na variável dependente.

Na validação quantitativa, pode-se avaliar o valor dos coeficientes de forma individual, principalmente o termo constante do modelo, ou seja, o valor do consumo energético quando o valor das variáveis independentes é igual a zero (intercepto). Neste caso o valor de β_1 deve apresentar um significado físico plausível que explique a existência do consumo energético quando a produção for igual a zero.

A validação física deve ser realizada em conjunto com a equipe técnica envolvida com o processo/equipamento para um completo entendimento do modelo. Uma vez realizada essa primeira etapa de validação, o modelo deve ser validado segundo os principais testes estatísticos.

Validação estatística do modelo

Após a validação física do modelo, é necessário realizar uma análise estatística robusta para avaliar a representatividade do modelo, visando minimizar as incertezas existentes e garantir uma previsibilidade dos novos pontos na fase de quantificação dos custos evitados.

Neste sentido, optou-se pelos principais testes, são eles:

- Coeficiente de determinação (R^2);
- Coeficiente de determinação Ajustado (R^2 ajustado);
- Erro médio Quadrado (MSE);
- Coeficiente de Variação (CV);
- Estatística t-student; e
- Estatística F (ANOVA).

R² e R² Ajustado

O coeficiente de determinação (R^2) representa a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo e pode ser calculado segundo a Eq.(1). Quanto mais próximo de 1 melhor o modelo se ajusta aos dados.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [\hat{y}_i - \bar{y}]^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

É importante ressaltar que, a obtenção de um modelo com R^2 próximo a 1 não significa necessariamente que ele conseguirá prever satisfatoriamente novas observações. Abaixo estão descritas algumas observações que devem ser levadas em consideração na análise do R^2 :

- Uma quantidade reduzida de dados para construção do modelo não tende a fornecer uma estimativa precisa da relação entre variáveis dependentes e independentes. *Softwares* de análises estatísticas como o MINITAB sugerem amostras acima de 40 elementos.
- O R^2 sempre aumenta com a inclusão de novas variáveis independentes, mesmo que não exista uma melhoria real no modelo. Neste sentido o R^2 é mais indicado apenas na comparação entre modelos com o mesmo número de variáveis independentes.
- Valores de R^2 próximos a 1 podem indicar um *overfitting* do modelo, neste sentido é importante avaliar o gráfico dos resíduos para buscar possíveis inconformidades.

Para os casos em que se deseja avaliar modelos com quantidades diferentes de variáveis independentes utiliza-se o coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) que pode ser calculado a partir da Equação(2).

$$R_{Ajustado}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) (1 - R^2) \quad (2)$$

O R^2 ajustado é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores (k) do modelo em relação ao número de observações (n).

Erro Médio Quadrático (EMQ)

Juntamente com o R^2 e R^2 ajustado o EMQ apresenta-se como uma técnica relevante na avaliação da acurácia de modelo. O EMQ pode ser calculado utilizando a Equação(3). Observa-se, portanto que, dado o termo quadrático, os maiores resíduos recebem um maior peso influenciando diretamente no resultado do somatório.

$$EMQ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (3)$$

Neste sentido, valores baixos de EMQ indicam que a maioria dos dados apresentam resíduos baixos em relação ao ponto real. Entretanto, pelo fato de apresentar uma maior sensibilidade, a técnica tende a apresentar valores discrepantes quando os pontos a serem estimados pelo modelo são *outliers*.

Por esta razão é necessário realizar uma análise prévia dos pontos que irão compor o modelo para evitar a inclusão de pontos espúrios.

Coefficiente de Variação (CV)

O coeficiente de variação é uma medida da dispersão que descreve a variação nos dados em relação à média e pode ser calculado segundo a Eq.(4).

$$CV = \frac{s}{\bar{Y}} \quad (4)$$

Observa-se que o numerador apresenta o desvio em relação à média, quanto menor for o valor de CV mais homogêneas serão as amostras. Embora não tenha uma relação direta com o modelo, o CV é uma importante ferramenta dado que valores elevados de CV , ou seja, dados com variabilidade elevada em relação à média, tendem a produzir modelos pouco representativos.

Uma forma alternativa de avaliar diretamente o modelo da linha de base é analisando a variação do erro médio quadrático (EMQ) em relação à média segundo a Equação(5). Tanto para o CV quanto para o $CV(EMQ)$ pode-se utilizar a métrica de obtenção de valores menores que 5%.

$$CV_{EMQ} = \frac{\sum_i^{n-1} (Y_i - \widehat{Y}_i)^2 / n}{\bar{Y}} \quad (5)$$

Estatística t- student

A partir do modelo criado é possível realizar uma avaliação da significância dos fatores a partir da análise dos seus respectivos coeficientes. Esta análise é relevante para avaliar se os fatores do modelo possuem relevância na variação da resposta.

Tomando como exemplo a equação 1, poderíamos avaliar o parâmetro β_0 para determinar a significância do fator “Produção”. Para isso considera-se a seguinte hipótese descrita pela Equação(6).

Caso a hipótese nula (H_0) se confirme, o parâmetro produção não possui relevância estatística na variação da resposta $Consumo_{Energético}$. Do contrário, o fator é significativo na alteração da variável resposta.

$$\begin{cases} H_0 : \beta_0 = 0 \\ H_A : \beta_0 \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

O valor da estatística t do coeficiente pode ser calculada a partir da Eq.(7), onde EP_{β_0} representa o valor do erro padrão atrelado a estimativa do coeficiente β_0 .

$$t_{obs} = \frac{\beta_0 - \beta_0^{H_0}}{EP_{\beta_0}} \quad (7)$$

Alternativamente o valor de t também pode ser calculado segundo a Eq.(8), entretanto, a hipótese avaliada está vinculada com a existência de correlação entre o fator e a resposta, conforme apresentado na Eq.(9), onde ρ é o valor da correlação de Pearson calculado pela Eq.(10).

$$t_{obs} = \frac{\rho\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho^2}} \quad (8)$$

$$\begin{cases} H_0 : \rho = 0 \\ H_A : \rho \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\rho = \frac{cov(x,y)}{s_x s_y} \quad (10)$$

Após calcular o valor de t_{obs} através de uma das abordagens supracitadas, compara-se com o valor com o $t_{critico}$ obtido com base na tabela da distribuição t-student (Anexo A) considerando o nível de significância definido e o grau de liberdade calculado por $N - 2$.

Caso o t_{obs} esteja contido na região crítica RC (Eq.(11)), ou seja, $t_{obs} > t_{critico}$, é possível indicar que a o fator produção é relevante para explicar o $Consumo_{Energético}$.

$$RC :]-\infty; -t_{critico}] \cup [t_{critico}; \infty[\quad (11)$$

Análise de Variância

O teste F é utilizado fundamentalmente para avaliar se as médias de três ou mais grupos distintos são estatisticamente iguais. Para isso são calculadas as variâncias de cada grupo e a variância global. De uma forma conceitual e simplificada é possível calcular o valor de F através da Eq.(12) abaixo:

$$F = \frac{\text{Variação entre médias da amostra}}{\text{Variação dentro das amostras}} \quad (12)$$

O teste F é flexível e pode ser aplicado para avaliar a significância global de um modelo de regressão e comparar os ajustes de diferentes modelos. Enquanto o teste t é utilizado apenas para avaliação individual dos coeficientes de regressão, o teste F permite a avaliação conjunta de vários coeficientes ao mesmo tempo. As hipóteses para o teste F no caso da regressão de um modelo genérico (Eq.(13)), são representadas pela Eq.(14).

$$Y = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + e \quad (13)$$

$$\begin{cases} H_0 : \beta_0 = \beta_1 = 0 \text{ (Intercepto)} \\ H_A : \text{Pelo menos um } \beta_i \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

No modelo somente com o intercepto, todos os valores ajustados são iguais ao intercepto do modelo, ou seja, igual ao valor da variável dependente quando todas as variáveis independentes são iguais a zero. Desta forma, caso confirmada a hipótese H_0 os termos do modelo não são significativos.

Para modelos com uma única variável, o cálculo da estatística F pode ser realizado a partir do cálculo inicial das somas dos quadrados total, do resíduo e da regressão com base nas Equações(15), (16) e (17) respectivamente.

$$SQ_{Total} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (15)$$

$$SQ_{Resíduo} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (16)$$

$$SQ_{Regressão} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (17)$$

A SQ_{Total} representa a variação total de Y ao redor de sua média ou valor médio (soma dos quadrados total), enquanto $SQ_{Resíduo}$ é a variabilidade da variável dependente não explicada pelo conjunto de variáveis independentes. $SQ_{Regressão}$ representa a variabilidade de Y explicada pelo conjunto de variáveis independentes.

Para modelos multivariáveis os parâmetros são calculados seguindo as equações (18), (19) e (20).

$$SQ_{Total} = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \quad (18)$$

$$SQ_{Resíduo} = \mathbf{y}^T \mathbf{y} - \mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (19)$$

$$SQ_{Regressão} = \mathbf{b}^T \mathbf{X}^T \mathbf{y} - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} \quad (20)$$

Em seguida, calcula-se o Erro Quadrático Médio (MQ) da regressão e do resíduo a partir das Eq.(21) e (22) e utilizando a Eq.(23) obtêm-se o valor da estatística F.

$$MQ_{Resíduo} = \frac{SQ_{Resíduo}}{GL_{Resíduo}} \quad (21)$$

$$MQ_{Regressão} = \frac{SQ_{Regressão}}{GL_{Regressão}} \quad (22)$$

$$F_{obs} = \frac{MQ_{Regressão}}{MQ_{Resíduo}} \quad (23)$$

Ao comparar o valor de F_{obs} com o F_{α} tabelado (Anexo B) a partir dos graus de liberdade do numerador (k) e denominador ($n-k-1$), avalia-se se a regressão apresenta significância estatística a partir da Equação(24).

$$\begin{cases} \text{Rejeitar } H_0 \text{ se } F > F_{\alpha} \\ \text{Não Rejeitar } H_0: F \leq F_{\alpha} \end{cases} \quad (24)$$

Para validação do modelo da linha de base, busca-se, portanto, a rejeição de H_0 indicando que os coeficientes da regressão fornecem um modelo melhor do que o intercepto da variável dependente (Y). Neste caso, um valor de $p < \alpha$ também estará associado.

Alguns pressupostos são necessários para garantir a confiabilidade estatística dos resultados da ANOVA (ROCHA e BACELAR JÚNIOR, 2018), são eles:

- Homocedasticidade: As variâncias dos resíduos precisam ser estatisticamente iguais entre os níveis experimentais;
- Normalidade: Os resíduos precisam apresentar uma distribuição normal;
- Independência: A correlação entre os resíduos dos níveis precisa ser nula, ou seja, uma observação não pode ter efeito na outra.

O resíduo pode ser definido estatisticamente como a diferença de entre cada uma das observações experimentais e a média do tratamento correspondente (BUSSAB, 1988).

Testes como Bartlett, Cochran e Levene podem ser aplicados para o caso da homocedasticidade bem como Anderson-Darling, Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk para a normalidade e Durbin Watson para a independência dos resíduos.

A Tabela B2 apresenta um resumo dos valores relacionados aos testes supracitados que são almejados para a validação estatística do modelo. Vale ressaltar que os valores podem ser flexibilizados em alguns casos, como por exemplo uma quantidade pequena de dados que impede uma maior representatividade do modelo. Nestes casos, os valores de validação

podem ser flexibilizados até a obtenção de mais dados para aumento da acuraria e representatividade do modelo.

Tabela B2 – Valores almejados para a validação estatística do modelo

Parâmetro	Valor
Coeficiente de Determinação (R^2)	>0,75
Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2 ajustado)	>0,75
Erro Médio Quadrático (EMQ)	<5%
Coeficiente de Variação (CV)	<20%
Estatística t dos coeficientes	>> t crítico
Estatística F	>> F crítico

De forma geral a validação física e estatística deve ser avaliada caso a caso, para aprovação ou rejeição do modelo levantado.

Apêndice C – Parâmetros do modelo

Força motriz

As conversões energéticas observadas na combustão ou queima dos combustíveis proporciona a energia térmica que as máquinas térmicas (motores ou turbinas) convertem parcialmente em força motriz, a energia útil pretendida;

Essas conversões ocorrem com eficiências tipicamente entre 30 a 45%, com a maior parte da energia química do combustível sendo necessariamente rejeitada pela máquina como energia térmica sob temperaturas médias;

Nas aplicações estacionárias essa energia térmica, disponível em temperaturas próximas a 350 °C, pode eventualmente ser utilizada para aquecimento em uma ampla gama de processos;

Para esses casos, assumindo como potencialmente factível a utilização de 50% da energia térmica disponível nesses efluentes. Desta forma, o fator pode ser calculado por:

$$F_k = 0,5$$

Aquecimento indireto

Aproveitando das elevadas taxas de troca térmica possíveis com o uso de vapor saturado e separando o processo de geração de energia térmica mediante combustão e consequente produção de gases de chaminé, dos processos subsequentes de utilização dessa energia térmica, e eventualmente utilizando outros fluidos térmicos, o aquecimento indireto é largamente utilizado para atender demandas térmicas em temperaturas médias e baixas, como observado em processos de cozimento, secagem e concentração encontrados em indústrias de alimentos e bebidas, têxteis, papel e celulose, entre outros;

Embora sejam geralmente altas as eficiências na conversão da energia química do combustível em energia térmica, por exemplo em caldeiras a vapor, sem considerar os processos subsequentes de transporte e efetivo uso final, como ocorre em secadores e cozedores, é notável observar que, devido à grande diferença de temperatura entre a geração e utilização de energia térmica, é possível gerar energia elétrica ou mecânica sem consumo adicional de energia;

Tal potencial pode ser utilizado nos sistemas de cogeração, atualmente bastante difundidos na indústria sucroalcooleira e na produção de celulose, e ainda limitadamente adotados em outras indústrias e consumidores do setor terciário que conjugam demandas de energia elétrica e térmica.

Para estimar a energia elétrica passível ser produzida, com auxílio do Coeficiente de Carnot, assumindo a instalação de sistemas de cogeração com 50% da eficiência dos ciclos ideais, a

montante do uso térmico, operando entre a temperatura na qual a energia térmica é produzida (assumida conservadoramente a 800 °C, valor inferior à temperatura de chama típica para os combustíveis de uso corrente na indústria), e a temperatura de utilização dessa energia, que pode ser assumida em 300 °C, na falta de informações mais detalhadas;

Energia elétrica potencialmente gerada, a partir da energia térmica consumida, por um sistema de cogeração com 50% de eficiência em relação ao ciclo ideal operando entre 800 °C e 300 °C, chega-se ao fator relacionado a energia potencialmente factível de ser recuperada:

$$F_k = (A_{800} - A_{300})0,5$$

em que A_{800} representa a temperatura de operação 800 °C, A_{300} temperatura de operação de 300 °C e 0,5 representa um sistema de cogeração com 50% de eficiência em relação ao ciclo ideal operando entre 800 °C e 300 °C.

Aquecimento direto

Os processos que necessitam de aquecimento direto, como observado na indústria cerâmica, cimenteiras e alguns processos siderúrgicos, operam geralmente sob temperaturas elevadas, superiores a 1.000 °C.

Naqueles contextos em que há uma atenção para a eficiência energética, os gases sob alta temperatura efluentes desses processos podem ser utilizados em sistemas de regeneração e/ou pré-aquecimento do ar de combustão ou da carga, reduzindo significativamente as perdas.

Por outro lado, quando esses efluentes não são valorizados e dispersos no ambiente, as perdas elevadas podem ser quantificadas com auxílio do Coeficiente de Carnot ou de Curzon e Ahlborn em termos da energia elétrica que representariam a produção de sistemas de cogeração reversíveis (ideais) instalados a jusante do uso térmico;

Nesse caso, assumindo uma recuperação de 80% da energia térmica rejeitada a uma temperatura de 800 °C.

$$F_k = 0,8A_{800}$$

Conversão de energia elétrica em energia térmica para aquecimento indireto

Em alguns processos que necessitam de aquecimento indireto, operando a temperaturas relativamente baixas, pode ser empregado a energia elétrica, em sistemas operando com eficiências aparentemente elevadas. Contudo, a alta qualidade energética disponível na energia elétrica é bastante degradada nessa conversão, como pode ser verificado ao verificar o valor equivalente da energia térmica produzida, com auxílio do Coeficiente de Carnot ou de Curzon e Ahlborn.

A modelagem desse processo de conversão de energia elétrica se efetua estimando o valor equivalente da energia térmica produzida, com auxílio do respectivo Coeficiente de Carnot ou de Curzon e Ahlborn.

Considerando que essa energia térmica poderia ser fornecida por sistemas tecnologicamente mais avançados e eficientes, com desempenho estimado da ordem de 75% dos processos reversíveis ideais em condições similares, resulta uma produção virtual ou em termos práticos, uma economia de energia elétrica. Energia térmica útil, avaliada como energia elétrica potencialmente gerada:

$$ER_{ijk} = EF_{ij}\eta_{ijk}A_{300}$$

Energia elétrica potencialmente economizada ou disponibilizada, assumindo a adoção de sistemas eficientes para conversão de energia elétrica em energia térmica:

Produção de frio com energia elétrica

Os processos que necessitam de aquecimento direto, como observado na indústria cerâmica, cimenteiras e alguns processos siderúrgicos, operam geralmente sob temperaturas elevadas, superiores a 1.000 °C.

As tecnologias para produção de frio empregando ciclos térmicos de compressão de vapor têm evoluído, incorporando sistemas de controle avançados e trocadores de calor otimizados, alcançando alto desempenho.

Não obstante, a utilização de sistemas integrando o uso das correntes térmicas disponíveis a temperaturas acima e abaixo da condição ambiente, altamente eficientes e passíveis de aplicação especialmente em indústrias de alimentos (abatedouros de aves, matadouros/frigoríficos).

Nesse caso, trata-se de avaliar a energia térmica efluente, modelando o sistema de produção de frio como uma bomba de calor, com dois componentes de energia útil, a energia efluente fria e a energia efluente quente, dada pela soma da carga térmica removida sob baixa temperatura e a energia elétrica consumida. A energia térmica absorvida a baixa temperatura (carga térmica) é definida por:

$$ER_{ijk} = EF_{ij}p_{ijk} \left(1 + \frac{1}{\eta_{ijk}COP_{REV}} \right)$$

Onde:

$$COP_{REV} = \frac{T_Q}{T_Q - T_F}$$

Produção de frio com energia térmica

A produção de frio empregando ciclos de absorção, ainda que mais complexa e factível em escalas e condições de operação mais estáveis, representa uma alternativa de interesse para as indústrias que dispõem de excedentes de correntes térmicas de média temperatura e apresentam demandas de frio relevantes, bem como em sistemas de cogeração que operam a montante dos processos de aquecimento indireto.

Nessas condições se alcançam grandes economias de energia, permitindo reduzir o consumo de energia elétrica na produção de frio para níveis até duas ordens de magnitude inferiores e no caso de sistemas de cogeração, gerando a partir de combustíveis como o gás natural, energia elétrica e frio.

A modelagem da produção de frio mediante um ciclo de absorção, no contexto desse estudo, busca avaliar os fluxos de energia térmica envolvidos, a partir da carga térmica de frio, estimando o consumo necessário de energia térmica para a produção de frio e a energia térmica efluente, a ser disponibilizada para eventual consumo como energia útil para aquecimento.

Como no caso anterior, nas equações a seguir, se adota como referência para um ciclo real de absorção de vapor, com um Coeficiente de Performance correspondente a 50% do valor esperado para um ciclo ideal de absorção, cujo COP pode ser estimado apenas com base nas temperaturas de operação.

$$EF_{ijk} = \frac{EU_{ij}}{COP_{IRREV}}$$

$$COP_{IRREV} = \frac{T_F}{T_Q - T_F} (T_h - T_{amb})$$

T_h : Temperatura da energia térmica fornecida ao ciclo de absorção, entregue ao gerador de vapor do fluido frigorífico nesse ciclo (°C);

$$ER_{ijk} = EF_{ijk} + EU_{ij}$$

Ainda que possível e efetivamente existente em algumas indústrias e centros comerciais no Brasil, não se identificou no BEU 2005 e nos resultados disponibilizados do Projeto Meta dados e casos sobre esse tipo de conversão final de energia, possivelmente por não se constituir na primeira conversão da energia final nos consumidores

Parâmetros para Avaliação das Perdas Energéticas

Um dos principais parâmetros para definição e quantificação da representatividade de determinado uso final/energético em determinado segmento industrial é o coeficiente de destinação, que pode ser assim definido: corresponde à parcela da energia final entregue ao cada segmento industrial que é destinada a cada uso final, que compõem as tabelas setoriais de coeficientes de destinação, estimados com base em estudos de campo e informações da literatura técnica. Deste modo, da Tabela C1 a Tabela C4 são apresentados os respectivos coeficientes de destinação empregados neste trabalho.

Tabela C1 – Coeficiente de destinação para os setores de Cimento e Ferro gusa & Aço

	Cimento							Ferro gusa & Aço						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural			1,00						0,01	0,99				
Carvão Vapor			1,00							1,00				
Carvão Metalúrgico														
Lenha			1,00							1,00				
Produtos da Cana														
Outras Fontes Primárias		1,00												
Óleo Diesel	1,00							1,00						
Óleo Combustível		0,16	0,84							1,00				
Gasolina														
GLP			1,00							1,00				
Querosene														
Gases de Processo										1,00				
Coque de Carvão Mineral			1,00							1,00				
Eletricidade	0,98			0,00	0,01		0,00	0,73		0,27		0,01		
Carvão Vegetal			1,00							1,00				
Álcool Etílico														
O F S Petróleo			1,00							1,00				
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C2 - Coeficiente de destinação para os setores de Mineração & Pelotização e Não ferrosos e outros da metalurgia

	Mineração & Pelotização							Não ferrosos e outros da metalurgia						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural		0,50	0,50						0,10	0,90				
Carvão Vapor		0,09	0,92						1,00					
Carvão Metalúrgico														
Lenha														
Produtos da Cana														
Outras Fontes Primárias														
Óleo Diesel	0,83	0,17	0,00					0,93		0,07				
Óleo Combustível		0,08	0,92						0,41	0,59				
Gasolina														
GLP			1,00					1,00						
Querosene		1,00												
Gases de Processo														
Coque de Carvão Mineral			1,00							1,00				
Eleticidade	0,90	0,02	0,05		0,03		0,00	0,32		0,15		0,00	0,53	0,00
Carvão Vegetal										1,00				
Álcool Etílico														
O F S Petróleo		0,50	0,50							0,29			0,71	
Alcatrão														

Fonte: PDef, 2020

Tabela C3 - Coeficiente de destinação para os setores Têxtil e Celulose & Papel

	Têxtil							Celulose & Papel						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural		0,94	0,06						1,00					
Carvão Vapor									1,00					
Carvão Metalúrgico														
Lenha		0,82	0,18						1,00					
Produtos da Cana									1,00	0,00				
Outras Fontes Primárias									1,00					
Óleo Diesel	0,60	0,20	0,20						1,00					
Óleo Combustível		0,94	0,06						0,41	0,59				
Gasolina														
GLP	0,03	0,84	0,13							1,00				
Querosene														
Gases de Processo														
Coque de Carvão Mineral														
Eletricidade	0,58			0,40	0,02		0,01	1,00				0,00		
Carvão Vegetal														
Álcool Etílico														
O F S Petróleo														
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C4 - Coeficiente de destinação para os setores Químico e Celulose & Alimentos & Bebidas

	Químico							Alimentos & Bebidas						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural	0,01	0,85	0,13				0,00		0,87	0,13				
Carvão Vapor		0,91	0,09						0,74	0,26				
Carvão Metalúrgico														
Lenha		0,85	0,15						0,79	0,21				
Produtos da Cana									1,00					
Outras Fontes Primárias		0,55	0,45						0,50	0,50				
Óleo Diesel	1,00							0,95	0,02	0,03				
Óleo Combustível		0,87	0,13						1,00					
Gasolina														
GLP	0,05	0,15	0,80					0,28	0,18	0,55				
Querosene														
Gases de Processo														
Coque de Carvão Mineral														
Eletricidade	0,65	0,01	0,01	0,03	0,02	0,27	0,00	0,74			0,21	0,05		
Carvão Vegetal		0,20	0,80											
Álcool Etílico														
O F S Petróleo		0,67	0,33						0,50	0,50				
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C5 - Coeficiente de destinação para o setor Cerâmico

	Cerâmica						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural		0,12	0,88				
Carvão Vapor			1,00				
Carvão Metalúrgico							
Lenha			1,00				
Produtos da Cana							
Outras Fontes Primárias			1,00				
Óleo Diesel	1,00						
Óleo Combustível			1,00				
Gasolina							
GLP	1,00						
Querosene							
Gases de Processo							
Coque de Carvão Mineral							
Eletricidade	0,88		0,01	0,05	0,06		
Carvão Vegetal							
Álcool Etílico							
O F S Petróleo			1,00				
Alcatrão							

Fonte: PDEf, 2020

Além dos parâmetros já apresentados, visando uma maior discriminação das perdas e dos potenciais para incrementar a eficiência energética nos setores de consumo, adotando a abordagem apresentada no tópico precedente, qualificando os fluxos térmicos, são requeridos valores de temperatura e rendimentos de sistemas reais, em relação a sistemas ideais de cogeração e produção de frio, dados relevantes para avaliar as possibilidades de cogeração, integração de processos e outras medidas visando ganhos de eficiência.

Na tabela A10 são apresentados os valores de temperaturas utilizados neste estudo. Esses valores representativos de temperatura foram reunidos e brevemente comentados, podendo ser adotados sempre que a identificação de valores representativos para os segmentos industriais não for possível. Nesse contexto, deve ser estimulada obtenção de dados de temperatura mediante levantamentos reais em unidades consumidoras, atendendo à necessária consistência estatística, em base setorial, e quando cabível em base regional.

Tabela C6 - Valores de temperaturas utilizados neste estudo.

Temperatura	Valor de referência	Comentário
Temperatura ambiente	25°C	Valor adotado internacionalmente
Temperatura da energia térmica efluente de processos de aquecimento direto	800°C	A ser considerado no caso de sistema de baixo rendimento, sem recuperação ou regeneração térmica.
Temperatura da energia térmica usada em processos de aquecimento indireto	300°C	Valor considerado representativo de instalações reais.
Temperatura do lado frio do ciclo de refrigeração	-10°C	Correspondente à temperatura de evaporação do fluido refrigerante
Temperatura do lado frio do ciclo de refrigeração para sistemas de ar condicionado	6°C	Correspondente à temperatura de evaporação do fluido refrigerante
Temperatura do lado quente dos ciclos de refrigeração	38°C	Correspondente à temperatura de condensação do fluido refrigerante
Temperatura da energia térmica fornecida ao ciclo de absorção	130°C	Valor usual em instalações frigoríficas reais de absorção.

Fonte: PDEf, 2020

De forma análoga às temperaturas, foram adotados valores para os rendimentos dos processos de recuperação energética das perdas, que, neste nível de análise e prospecção, utiliza processos ideais (reversíveis, cujo desempenho depende apenas das temperaturas) de conversão energética como referência para a estimativa de rendimento de processos reais (Cullen, 2009), como apresentado na Tabela C7. Assim, por exemplo, é possível usar rendimentos absolutos (dados em %) em sistemas frigoríficos, que usualmente empregam Coeficientes de Performance para expressar desempenho, que apresentam valores sempre bem superiores a 100%, dificilmente aplicáveis na análise das perdas do BEU.

Tabela C7 - Rendimentos considerados neste estudo.

Rendimento	Valor de referência	Comentário
Fração passível de ser utilizada da energia térmica rejeitada pela máquina térmica, visando processos de aquecimento indireto	50%	Valor representativo de sistemas convencionais, podem ser alcançados rendimentos mais elevados.
Fração passível de ser utilizada da energia térmica rejeitada em sistemas de aquecimento direto, visando processos de geração elétrica	80%	A ser considerado no caso de sistema de baixo rendimento, sem recuperação ou regeneração térmica.
Eficiência de um sistema de cogeração para a geração de energia elétrica, em relação a um ciclo ideal reversível.	50%	Valor representativo
Eficiência de uma bomba de calor convertendo energia elétrica em energia térmica para aquecimento, em relação a um ciclo ideal reversível.	75%	Valor usual
Eficiência de uma unidade de produção de frio, utilizando um ciclo por compressão de vapor, em relação a um ciclo ideal reversível.	50%	Valor usual
Eficiência de uma unidade de produção de frio, utilizando um ciclo por absorção de vapor, em relação a um ciclo ideal reversível.	50%	Valor usual

Os valores dos rendimentos para os equipamentos industriais mais representativos adotados no presente estudo para todos os processos energéticos nos diversos segmentos industriais estudados estão apresentados na Tabela C8.

Tabela C8 – Rendimentos adotados como referência neste estudo (%).

Segmento industrial	Equipamento	Cenário A		Cenário B	
		BEU 2005 Base	PDEf	BEU 2005 Referência	PDEf
Cimento	Motores elétricos	90	92	94	96
	Lâmpadas	24	18	29	25
	Produção de frio	60	69	70	75
Têxtil	Motores diesel	43	42	45	45
	Motores elétricos	90	92	94	96
	Lâmpadas	24	18	28	25
Ferro gusa, aço e ferro ligas	Produção de frio	75	69	80	75
	Motores diesel	45	42	45	45
	Motores elétricos	96	92	97	96
Mineração e pelotização	Lâmpadas	63	18	85	25
	Motores diesel	43	42	45	45
	Motores elétricos	90	92	94	96
Não ferrosos e outros da metalurgia	Lâmpadas	25	18	29	25
	Produção de frio	60	69	70	75
	Motores diesel	44	42	45	45
Química	Motores elétricos	92	92	97	96
	Lâmpadas	28	18	85	25
	Produção de frio	67	69	92	75

Segmento industrial	Equipamento	Cenário A		Cenário B	
		BEU 2005 Base	PDEf	BEU 2005 Referência	PDEf
Alimentos e Bebidas	Motores elétricos	90	92	97	96
	Lâmpadas	65	18	85	25
	Produção de frio	77	69	92	75
Celulose e Papel	Motores diesel	44	42	45	45
	Motores elétricos	91	92	97	96
	Lâmpadas	53	18	85	25
Cerâmica e Vidro	Motores diesel	44	42	45	45
	Motores elétricos	90	92	97	96
	Lâmpadas	26	18	85	25
	Produção de frio	63	69	92	75

Fonte: PDEf, 2020

Da Tabela C9 a Tabela C13 são apresentados os rendimentos para o cenário de referência dos diversos usos finais e para os respectivos energéticos. Por sua vez, da Tabela C14 a Tabela C18 são apresentados os rendimentos considerando a melhoria na performance energética devido a implementação de ações de eficiência energética.

Tabela C9 - Rendimentos de referência empregado no Cenário A do BEU do PDEf para os setores de Cimento e Ferro gusa & Aço

	Cimento							Ferro gusa & Aço						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural			0,51						0,90	0,70				
Carvão Vapor			0,51							0,76				
Carvão Metalúrgico														
Lenha			0,51							0,42				
Produtos da Cana														
Outras Fontes Primárias		0,65												
Óleo Diesel	0,42							0,42						
Óleo Combustível		0,75	0,51							0,70				
Gasolina														
GLP			0,51							0,71				
Querosene														
Gases de Processo										0,70				
Coque de Carvão Mineral			0,51							0,76				
Eletricidade	0,92			0,69	0,18		1,00	0,92		0,60		0,18		
Carvão Vegetal			0,51							0,76				
Álcool Etílico														
O F S Petróleo			0,51							0,70				
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C10 - Rendimentos de referência empregado no Cenário A do BEU do PDEf para os setores de Mineração & Pelotização e Não ferrosos e outros da metalurgia

	Mineração & Pelotização							Não ferrosos e outros da metalurgia						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural		0,78	0,55						0,94	0,65				
Carvão Vapor		0,68	0,55						0,92					
Carvão Metalúrgico														
Lenha														
Produtos da Cana														
Outras Fontes Primárias														
Óleo Diesel	0,42	0,78	0,55					0,42		0,60				
Óleo Combustível		0,78	0,55						0,83	0,78				
Gasolina														
GLP			0,55					0,33						
Querosene		0,78												
Gases de Processo														
Coque de Carvão Mineral			0,55							0,32				
Eletricidade	0,92	0,95	0,55		0,18		1,00	0,92		0,55		0,18	0,53	1,00
Carvão Vegetal										0,32				
Álcool Etílico														
O F S Petróleo		0,78	0,55							0,60			0,99	
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C11 - Rendimentos de referência empregado no Cenário A do BEU do PDEf para os setores Têxtil e de Celulose & Papel

	Têxtil							Celulose & Papel						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural		0,88	0,52						0,90					
Carvão Vapor									0,90					
Carvão Metalúrgico														
Lenha		0,77	0,32						0,83					
Produtos da Cana									0,85	0,50				
Outras Fontes Primárias									0,86					
Óleo Diesel	0,42	0,88	0,52						0,85					
Óleo Combustível		0,88	0,52						0,90	0,55				
Gasolina														
GLP	0,33	0,88	0,52							0,55				
Querosene														
Gases de Processo														
Coque de Carvão Mineral														
Eletricidade	0,92			0,69	0,18		1,00	0,92				0,18		
Carvão Vegetal														
Álcool Etílico														
O F S Petróleo														
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C12 - Rendimentos de referência empregado no Cenário A do BEU do PDEf para os setores Químico e Alimentos e Bebidas.

	Químico							Alimentos & Bebidas						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural	0,34	0,85	0,73						0,84	0,50				
Carvão Vapor		0,80	0,32						0,77	0,52				
Carvão Metalúrgico														
Lenha		0,77	0,32						0,80	0,52				
Produtos da Cana									0,80					
Outras Fontes Primárias		0,78	0,32						0,77	0,52				
Óleo Diesel	0,42							0,42	0,88	0,52				
Óleo Combustível		0,87	0,52						0,85					
Gasolina														
GLP	0,33	0,88	0,52					0,33	0,85	0,52				
Querosene														
Gases de Processo														
Coque de Carvão Mineral														
Eletricidade	0,92	0,97	0,69	0,69	0,18	0,63	1,00	0,92			0,69	0,18		
Carvão Vegetal		0,77	0,32											
Álcool Etílico														
O F S Petróleo		0,82	0,69						0,85	0,50				
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C13 - Rendimentos de referência empregado no Cenário A do BEU do PDEf para o setor de Cerâmica.

	Cerâmica						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural		0,74	0,56				
Carvão Vapor			0,42				
Carvão Metalúrgico							
Lenha			0,42				
Produtos da Cana							
Outras Fontes Primárias			0,40				
Óleo Diesel	0,42						
Óleo Combustível			0,55				
Gasolina							
GLP	0,33						
Querosene							
Gases de Processo							
Coque de Carvão Mineral							
Eletricidade	0,92		0,60	0,69	0,18		
Carvão Vegetal							
Álcool Etílico							
O F S Petróleo			0,55				
Alcatrão							

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C14 – Rendimentos de referência empregado no Cenário B do BEU do PDEf para os setores de Cimento e Ferro gusa & Aço

	Cimento							Ferro gusa & Aço						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural			0,54						0,95	0,84				
Carvão Vapor			0,54							0,81				
Carvão Metalúrgico														
Lenha			0,54											
Produtos da Cana														
Outras Fontes Primárias		0,68												
Óleo Diesel	0,45							0,45						
Óleo Combustível		0,79	0,54							0,84				
Gasolina														
GLP			0,54							0,84				
Querosene														
Gases de Processo										0,84				
Coque de Carvão Mineral			0,54							0,81				
Eletricidade	0,96			0,75	0,25		1,00	0,96		0,70		0,25		
Carvão Vegetal			0,54							0,81				
Álcool Etílico														
O F S Petróleo			0,54							0,84				
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C15 - Rendimentos de referência empregado no Cenário B do BEU do PDEf para os setores de Mineração & Pelotização e Não ferrosos e outros da metalurgia

	Mineração & Pelotização							Não ferrosos e outros da metalurgia						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural		0,80	0,60						0,95	0,90				
Carvão Vapor		0,70	0,60						0,83					
Carvão Metalúrgico														
Lenha														
Produtos da Cana														
Outras Fontes Primárias														
Óleo Diesel	0,45	0,80	0,60					0,45		0,65				
Óleo Combustível		0,80	0,60						0,85	0,90				
Gasolina														
GLP			0,60					0,36						
Querosene		0,80												
Gases de Processo														
Coque de Carvão Mineral			0,60							0,35				
Eletricidade	0,96	0,96	0,55		0,25		1,00	0,96		0,70		0,25	0,64	1,00
Carvão Vegetal										0,35				
Álcool Etílico														
O F S Petróleo		0,80	0,60							0,65			0,99	
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C16 - Rendimentos de referência empregado no Cenário B do BEU do PDEf para os setores Têxtil e de Celulose & Papel

	Têxtil							Celulose & Papel						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural		0,90	0,55						0,93					
Carvão Vapor									0,91					
Carvão Metalúrgico														
Lenha		0,82	0,35						0,89					
Produtos da Cana									0,86	0,53				
Outras Fontes Primárias									0,90					
Óleo Diesel	0,45	0,90	0,55						0,86					
Óleo Combustível		0,90	0,55						0,94	0,58				
Gasolina														
GLP	0,36	0,90	0,55							0,58				
Querosene														
Gases de Processo														
Coque de Carvão Mineral														
Eletricidade	0,96			0,75	0,25		1,00	0,96				0,25		
Carvão Vegetal														
Álcool Etílico														
O F S Petróleo														
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C16 - Rendimentos de referência empregado no Cenário B do BEU do PDEf para os setores Químico e Alimentos e Bebidas.

	Químico							Alimentos & Bebidas						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural	0,45	0,94	0,95						0,94	0,55				
Carvão Vapor		0,90	0,35						0,90	0,55				
Carvão Metalúrgico														
Lenha		0,90	0,35						0,90	0,55				
Produtos da Cana									0,90					
Outras Fontes Primárias		0,94	0,35						0,90	0,55				
Óleo Diesel	0,45							0,45	0,94	0,55				
Óleo Combustível		0,94	0,55						0,94					
Gasolina														
GLP	0,36	0,94	0,55					0,36	0,94	0,55				
Querosene														
Gases de Processo														
Coque de Carvão Mineral														
Eletricidade	0,96	0,98	0,75	0,75	0,25	0,78	1,00	0,96			0,75	0,25		
Carvão Vegetal		0,90	0,35											
Álcool Etílico														
O F S Petróleo		0,94	0,94						0,86	0,51				
Alcatrão														

Fonte: PDEf, 2020

Tabela C17 - Rendimentos de referência empregado no Cenário B do BEU do PDEf para o setor de Cerâmica.

	Cerâmica						
	Força Motriz	Aquecimento Indireto	Aquecimento Direto	Produção de Frio	Iluminação	Eletroquímica	Outros
Gás Natural		0,89	0,91				
Carvão Vapor			0,90				
Carvão Metalúrgico							
Lenha			0,90				
Produtos da Cana							
Outras Fontes Primárias		0,65	0,45				
Óleo Diesel	0,45						
Óleo Combustível			0,91				
Gasolina							
GLP	0,36						
Querosene							
Gases de Processo							
Coque de Carvão Mineral							
Eletricidade	0,96		0,88	0,75	0,25		
Carvão Vegetal							
Álcool Etílico							
O F S Petróleo			0,91				
Alcatrão							

Fonte: PDEf, 2020

Apêndice D – Tutorial do Mapa Interativo

Na Figura D1, é apresentada a interface principal do mapa interativo. Para adequado entendimento, a seguir será dado destaque aos principais filtros possíveis de serem empregados. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** estaca a lateral esquerda do Mapa Interativo apresentado anteriormente na Figura 59.

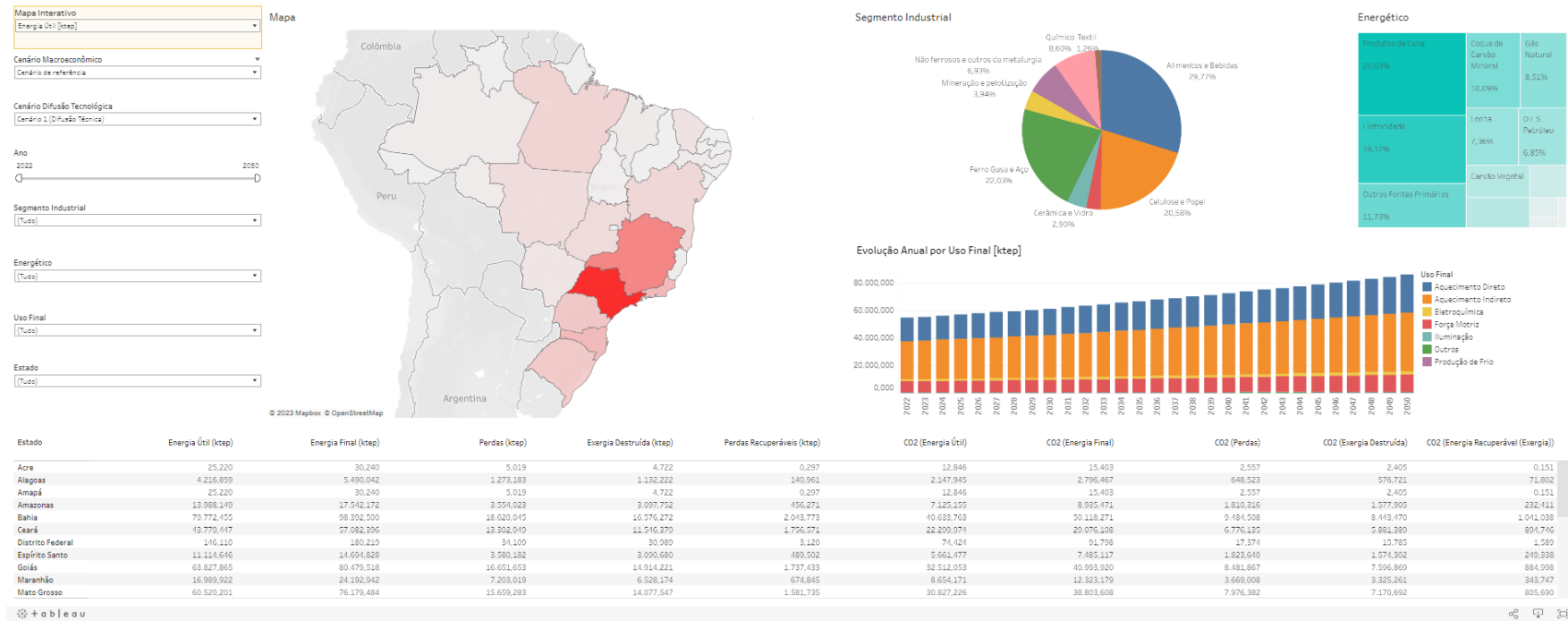


Figura D1 – Mapa interativo

Mapa Interativo

Energia Útil [ktep] ▼

Cenário Macroeconômico

Cenário de referência ▼

Cenário Difusão Tecnológica

Cenário 1 (Difusão Técnica) ▼

Ano

2022 2050

◁ ————— ▷

Segmento Industrial

(Tudo) ▼

Energético

(Tudo) ▼

Uso Final

(Tudo) ▼

Estado

(Tudo) ▼

Figura D2 – Aplicação dos filtros no Mapa Interativo

Por meio dos filtros apresentados na Figura D2 é possível escolher inicialmente qual Mapa Interativo o usuário deseja visualizar, conforme apresentado na Figura D3.

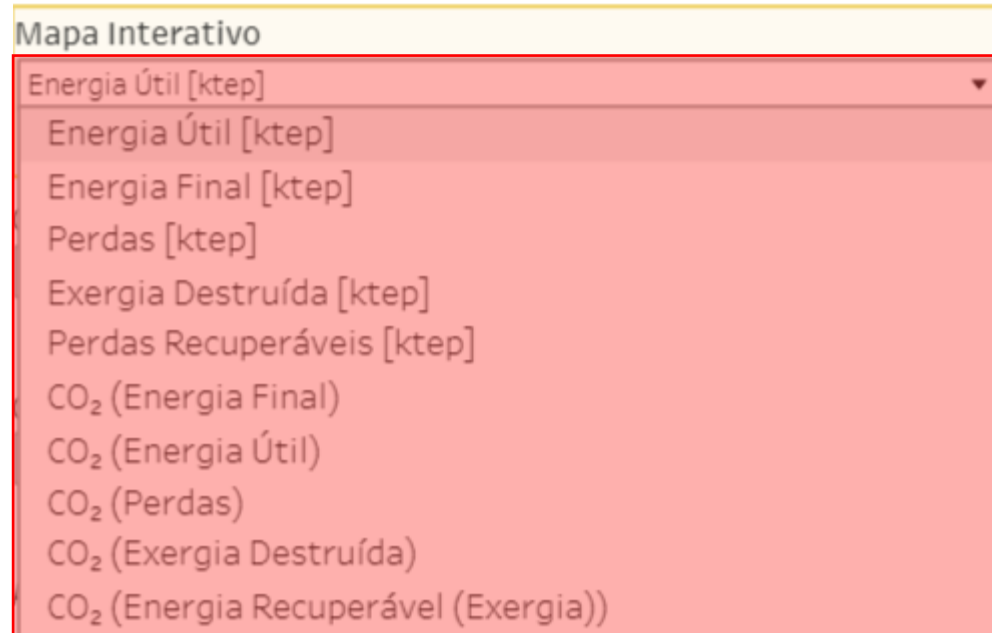


Figura D3 – Filtro para os diferentes Mapas Interativos.

Escolhido o Mapa Interativo desejado, no caso “Perdas Recuperáveis”, passa-se a escolha do cenário Macroeconômico, conforme ilustrado na Figura D4.

Mapa Interativo

Perdas Recuperáveis [ktep] ▼

Cenário Macroeconômico

Cenário de referência ▼

Cenário de referência

Cenário inferior

Cenário superior

Cenário 1 (Difusão Técnica) ▼

Figura D4 – Filtro para os cenários macroeconômicos.

Conforme ilustra a Figura D5, o próximo filtro é para a escolha do cenário de difusão tecnológica.

Mapa Interativo

Perdas Recuperáveis [ktep] ▼

Cenário Macroeconômico

Cenário de referência ▼

Cenário Difusão Tecnológica

Cenário 1 (Difusão Técnica) ▼

Cenário 1 (Difusão Técnica)

Cenário 2 (Difusão Econômica - induzida)

Cenário 3 (Difusão Econômica - natural)

Cenário 4 (Difusão Econômica - natural)

Linha de base

Figura D5 -- Filtro para os cenários de difusão tecnológica.

Após a escolha do cenário de difusão tecnológica, no caso “Econômica Natural”, o usuário deve selecionar o horizonte temporal (a título de exemplo optou-se por 2022 a 2050), objeto de sua análise, conforme indicado na Figura D6:

Mapa Interativo

Perdas Recuperáveis [ktep] ▼

Cenário Macroeconômico

Cenário de referência ▼

Cenário Difusão Tecnológica ▼

Cenário 3 (Difusão Econômica - natural) ▼

Ano

2022 2050

◁ ————— ▷

Figura D6 Filtro para o horizonte temporal de análise

Na sequência é possível escolher o(s) segmentos industriais objetos de análise. A Figura D7 apresenta a escolha pelos segmento de “Ferro Gusa e Aço”; “Mineração & Pelotização”; e “Não Ferrosos e outros da metalurgia”.

Mapa Interativo

Perdas Recuperáveis [ktep] ▼

Cenário Macroeconômico

Cenário de referência ▼

Cenário Difusão Tecnológica

Cenário 3 (Difusão Econômica - natural) ▼

Ano

2022 2050



Segmento Industrial

(Valores múltiplos) ▼

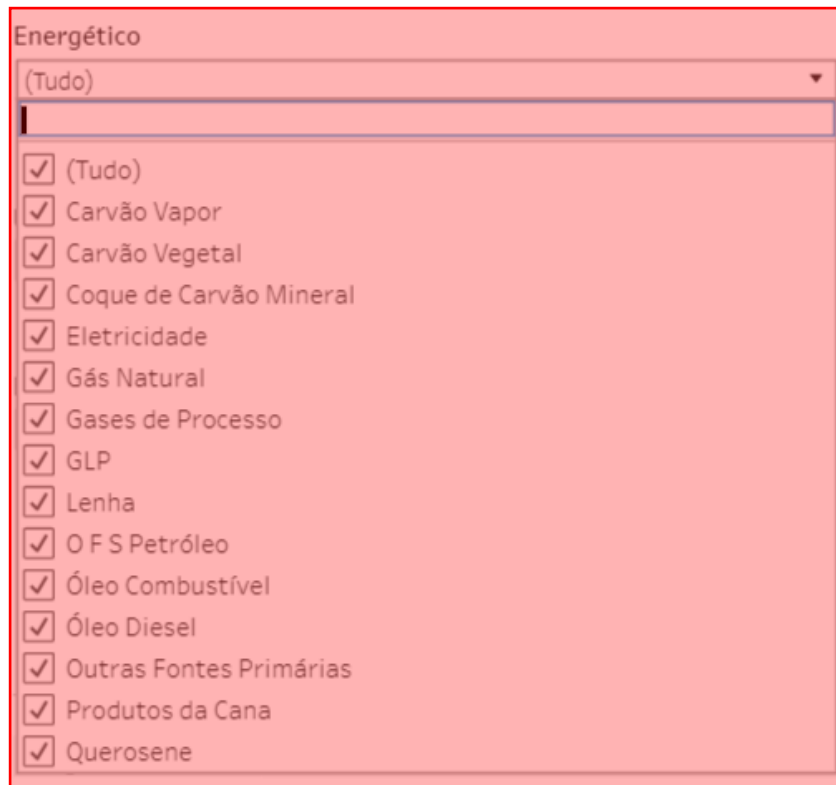
- (Tudo)
- Alimentos e Bebidas
- Celulose e Papel
- Cerâmica e Vidro
- Cimento
- Ferro Gusa e Aço
- Mineração e pelletização
- Não ferrosos e outros da metalurgia
- Químico
- Têxtil

Figura D7 – Filtro para seleção do segmento industrial

A próxima etapa é a seleção do(s) energético(s). Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** D8 optou-se por analisar os resultados para todos os energéticos.

Segmento Industrial

Mineração e pelletização



The image shows a software interface for selecting energy sources. At the top, there is a dropdown menu labeled 'Energético' with '(Tudo)' selected. Below this is a list of energy sources, each with a checked checkbox:

- (Tudo)
- Carvão Vapor
- Carvão Vegetal
- Coque de Carvão Mineral
- Eletricidade
- Gás Natural
- Gases de Processo
- GLP
- Lenha
- O F S Petróleo
- Óleo Combustível
- Óleo Diesel
- Outras Fontes Primárias
- Produtos da Cana
- Querosene

Figura D8 – Filtro para seleção dos energéticos

No que se refere ao uso final, a Figura D9 ilustra a escolha do “Aquecimento Direto” e “Aquecimento Indireto”.

Energético

(Tudo) ▼

Uso Final

(Valores múltiplos) ▼

- (Tudo)
- Aquecimento Direto
- Aquecimento Indireto
- Eletroquímica
- Força Motriz
- Iluminação
- Outros
- Produção de Frio

Figura D960 – Filtro para seleção do uso final

Por último é ainda possível selecionar o limite geográfico da análise por meio da caixa de seleção conforme ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Energético

(Tudo) ▼

Uso Final

(Valores múltiplos) ▼

Estado

(Tudo) ▼

(Tudo)

Acre

Alagoas

Amapá

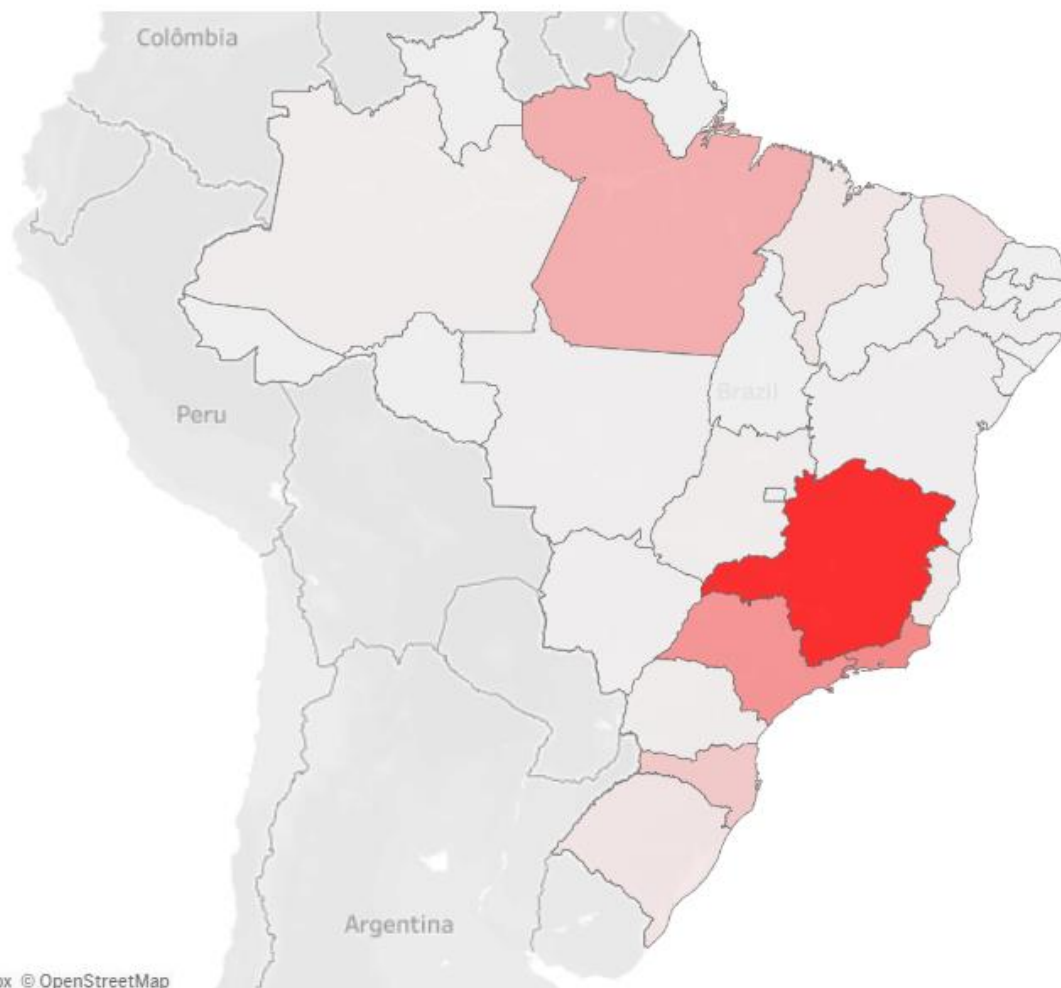
Amazonas

Bahia

Figura D10 – Filtro para o limite geográfico

Após aplicados os filtros apresentados anteriormente e ilustrados da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a Figura D17 obtém os resultados em formato de gráfico, conforme ilustrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

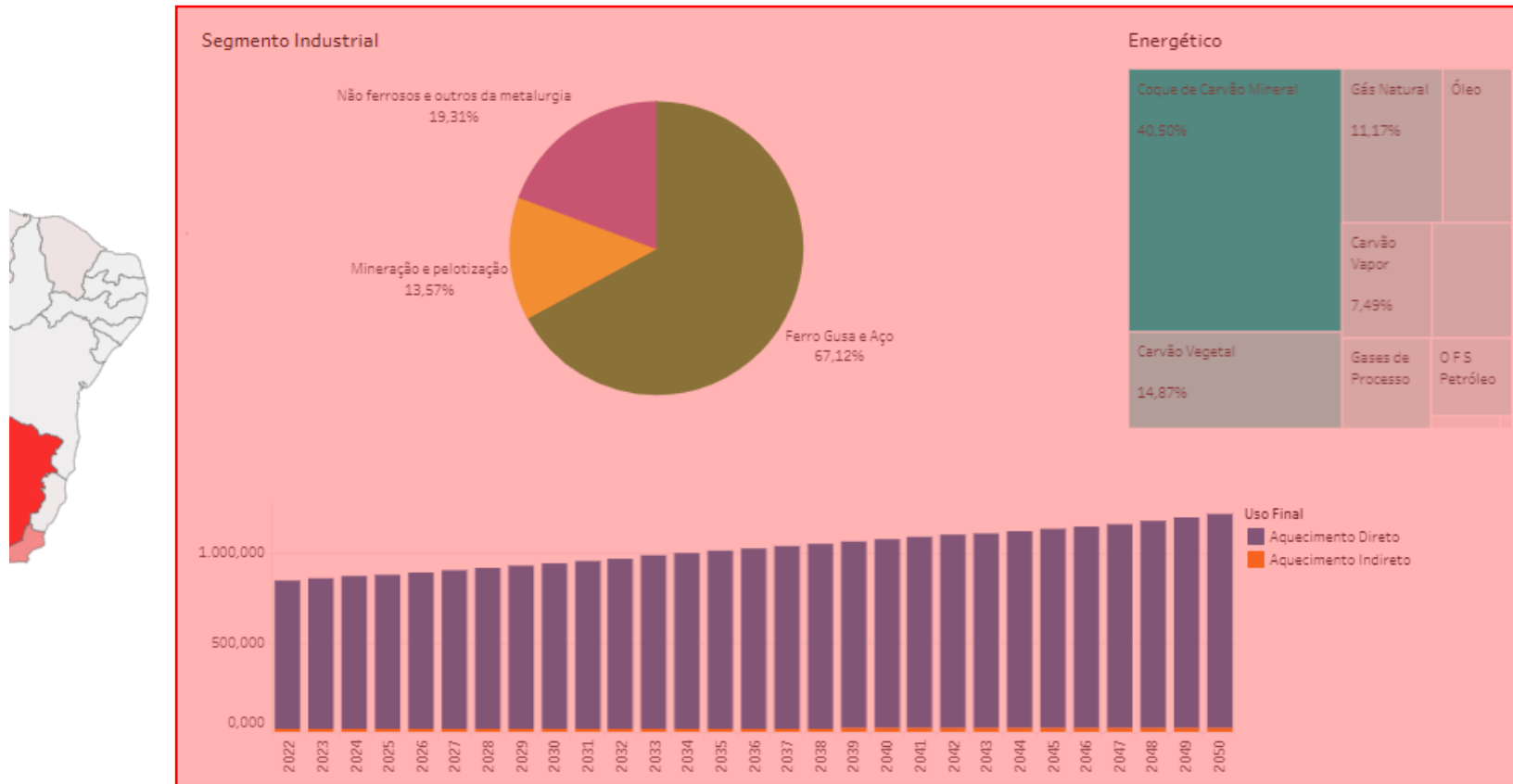
Mapa



© 2023 Mapbox © OpenStreetMap

Figura D11 – Resultado final em formato de Mapa

No canto superior direito, conforme ilustrado na Figura 12, aparecem os resultados em formato gráfico.



Recuperáveis (ktep)	CO2 (Energia Útil)	CO2 (Energia Final)	CO2 (Perdas)	CO2 (Energia Destruída)	CO2 (Energia Recuperável (Exergia
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
195 222	2 012 174	2 562 501	550 327	550 327	99 21

Figura D12 – Resultados gráficos

Em termos de resultados gráficos, o Mapa Interativo fornece três opções. Destaca-se antecipadamente que os resultados apresentados são dinâmicos e variam em função das seleções realizadas pelo usuário. Isso explica, por exemplo, a presença de somente três segmentos industriais no gráfico de pizza; a de somente dois usos finais no gráfico de barras; de todos os energéticos no gráfico de árvore; e do horizonte 2022 a 2050 no gráfico de barras, pois foram esses os filtros selecionados anteriormente. Adicionalmente, deve ser observado no gráfico de árvores que ele tem um *dégradé* de cores e tamanhos para destacar os energéticos mais representativos.

No que tange ao gráfico de pizza é oportuno destacar que no caso de o usuário clicar em um determinado segmento industrial, conforme ilustrado na Figura D13 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** todos os resultados seguintes passam a ser representativos deste segmento. Ademais, é digno de nota que se pode também selecionar mais de um segmento acionando a tecla “ctrl” do teclado.

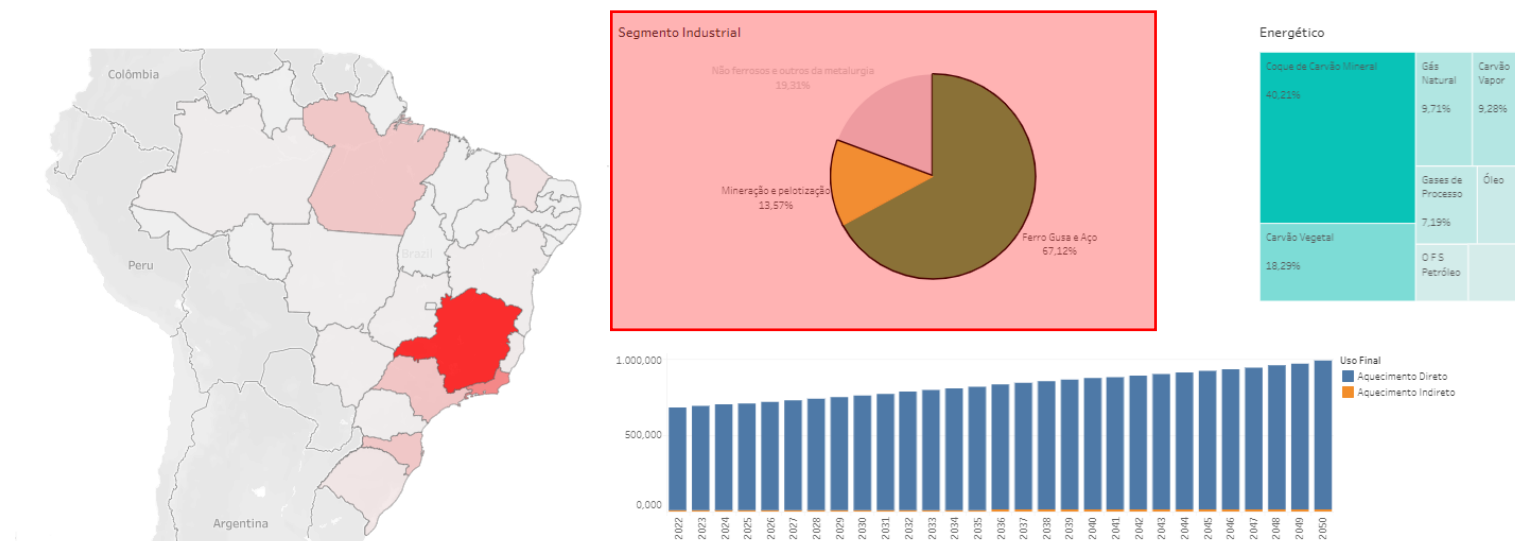


Figura D13 – Interatividade do gráfico de pizza

Após a apresentação dos principais resultados, passa-se agora, a fim de exemplificar os vários tipos de análises que podem ser realizadas, a etapa de análise qualitativa dos filtros implementados anteriormente. Neste sentido, e

resgatando os segmentos industriais aqui selecionados (“Ferro Gusa e Aço”; “Mineração & Pelotização”; e “Não Ferrosos e outros da metalurgia”) deve ser observado que eles são característicos, principalmente dos estados de Minas Gerais e do Pará, o que está em linha com o indicado no Mapa da **Erro! Fonte de referência não encontrada..** A demais, como foram selecionados apenas dois usos finais, a saber: aquecimento direto e indireto; e entendendo que nos segmentos industriais selecionados o elevado uso de fornos faz com que o aquecimento direto seja preponderante frente ao aquecimento indireto (caldeiras/vapor). Além disso, esses segmentos industriais são intensivos energeticamente em coque de carvão mineral e vegetal, o que novamente está condizente com os resultados apresentados no gráfico de árvores da mesma Figura D14.

Todos os resultados finais obtidos no estudo estão disponíveis em formato de tabela na parte inferior da página do Mapa Interativo, conforme ilustrado na Figura D14.

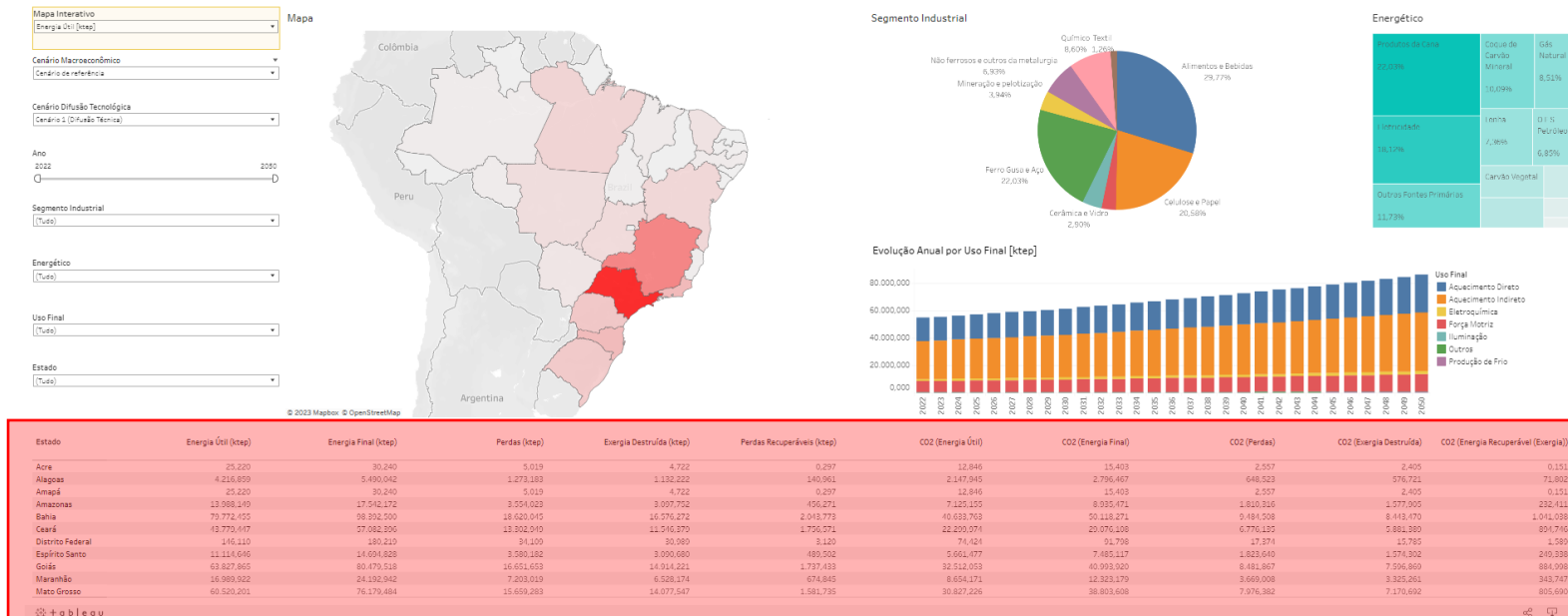


Figura D14– Resultados finais em formato de tabela

Ainda em relação a referida tabela, ela também é interativa, pois ao selecionar determinado valor na coluna referente especificamente ao Mapa interativo, no caso “Perdas Recuperáveis”, todo o Mapa Interativo se adequa a essa nova seleção. Deste modo, novamente a título de exemplo, foi selecionado as “Perdas Recuperáveis” no estado de “Minas Gerais”. Deste modo, observa-se na Figura D15 que toda a interface gráfica foi alterada para essa nova realidade.

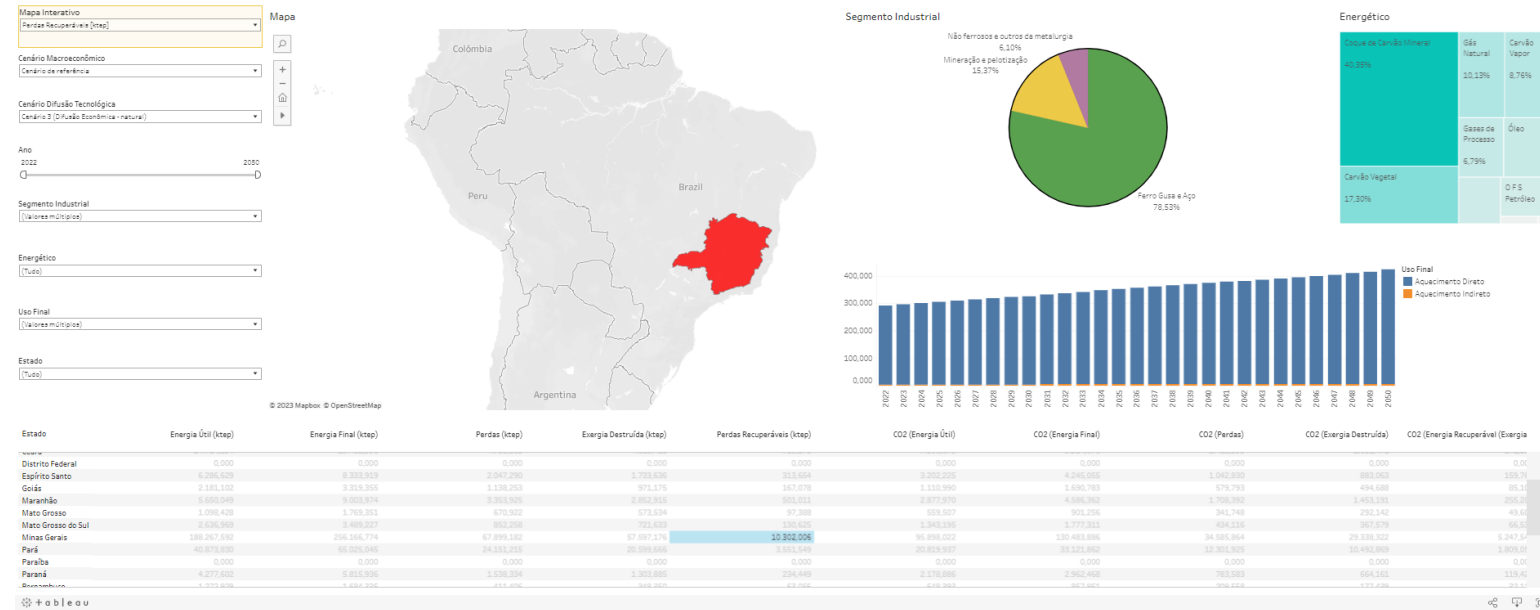


Figura D15 – Interatividade na tabela de dados

A Interatividade também está na interdependência dos resultados gráficos apresentados pela ferramenta. A título de exemplo, foi selecionado o estado de “Minas Gerais”; segmento de “Ferro Gusa e Aço” e para o energético “Coque de carvão mineral”. O resultado encontrado está apresentado na Figura D16.

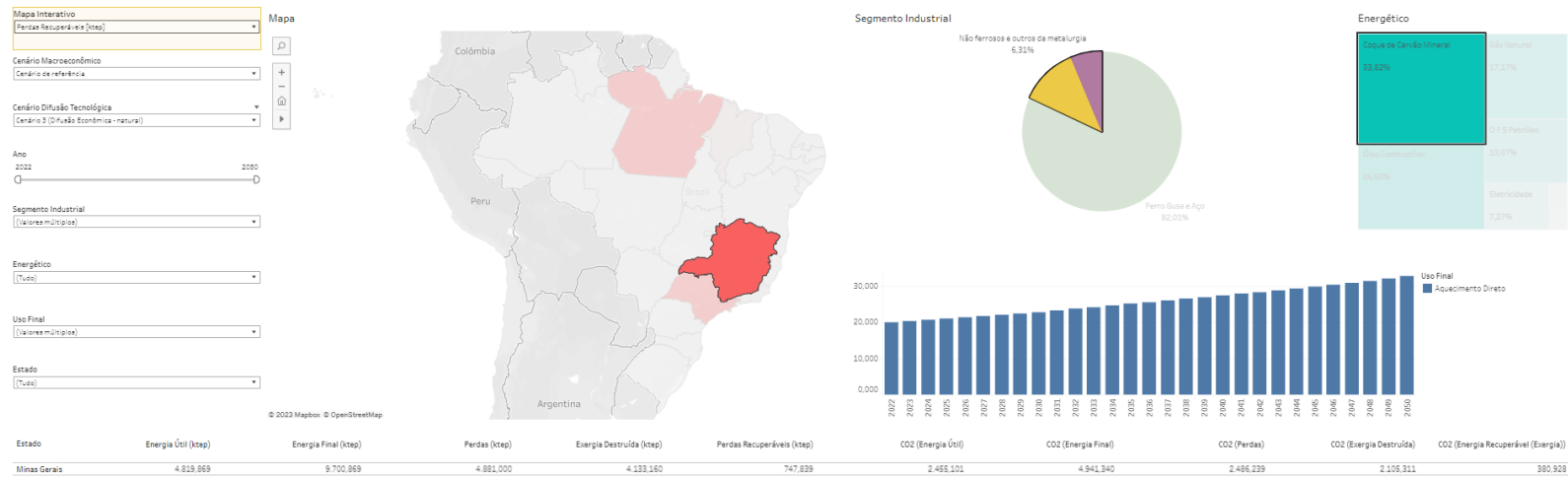


Figura D16 – Interatividade entre os resultados gráficos

Visando adequar a navegabilidade do usuário, o Mapa Interativo possui opções de zoom (ampliar e reduzir); opção para ampliar ou reduzir a área; voltar para a tela inicial; fazer uma movimentação panorâmica; seleção em forma de retângulo ou radial e até mesmo seleção múltipla por laço, conforme apresentado na Figura D17.

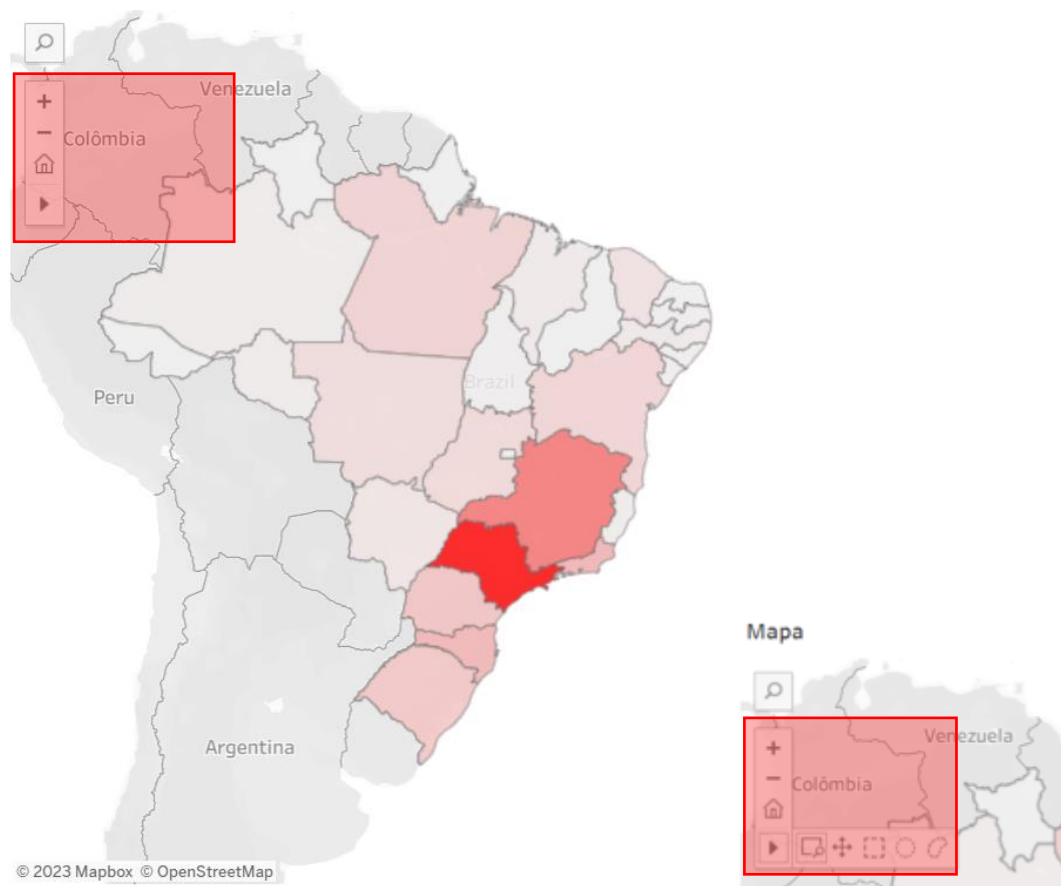


Figura D17 – Ajuste da navegabilidade no Mapa Interativo

Mapa Interativo ainda possui algumas funcionalidades acessórias disponíveis no canto inferior direito, como, por exemplo, o compartilhamento, conforme ilustrado na Figura D18.

CO2 (Perdas)	CO2 (Exergia Destruída)	CO2 (Exergia Recuperável (Exergia))
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
650,327	550,652	99,675
456,557	389,944	66,613
2.423,995	2.052,472	371,524
0,000	0,000	0,000
1.042,830	883,063	159,766
579,793	494,688	85,105
1.708,392	1.453,191	255,200
341,748	292,142	49,607
434,116	367,579	66,537

Compartilhar ✕

Exibição atual
Exibição original

Código inserido

```
<div class='tableauPlaceholder' id='viz
```

Link

<https://public.tableau.com/shared/4M>

Figura 61 – Compartilhamento das informações

Também é possível baixar os dados, de acordo com os filtros escolhidos pelo usuário, e em diferentes formatos conforme ilustrado na Figura D19.

CO2 (Perdas)	CO2 (Exergia Destruída)	CO2 (Energia Recuperável (Exergia))
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
650,327	550,652	99,675
456,557	389,944	66,613
2.423,995	2.052,472	371,524
0,000	0,000	0,000
1.042,830	883,063	159,766
579,793	494,688	85,105
1.708,392	1.453,191	255,200
341,748	292,142	49,607
434,116	367,579	66,537

Baixar ✕

Selecione seu formato de arquivo.

[Obter o aplicativo](#)

Figura D19 – Baixando os dados

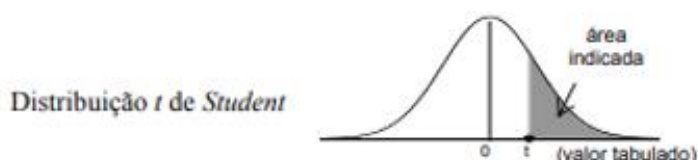
Ademais, é também possível colocar no modo de apresentação em tela cheia clicando no local destacado na

CO2 (Perdas)	CO2 (Exergia Destruída)	CO2 (Energia Recuperável (Exergia))
0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000
650,327	550,652	99,675
456,557	389,944	66,613
2.423,995	2.052,472	371,524
0,000	0,000	0,000
1.042,830	883,063	159,766
579,793	494,688	85,105
1.708,392	1.453,191	255,200
341,748	292,142	49,607
434,116	367,579	66,537

Figura D20 – Modo de exibição em tela cheia.

Anexo

Anexo A – Tabela da distribuição *t*-student



q/	Área na cauda superior								
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	2,996	3,340	3,591
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	2,952	3,281	3,520
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
z	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

Anexo B – Tabela da distribuição F

v1 →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	25	30
v2 ↓																	
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	242.98	243.90	245.95	248.02	249.05	249.26	250.10
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.46
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.70	8.66	8.64	8.63	8.62
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.86	5.80	5.77	5.77	5.75
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.62	4.56	4.53	4.52	4.50
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.94	3.87	3.84	3.83	3.81
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.51	3.44	3.41	3.40	3.38
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.22	3.15	3.12	3.11	3.08
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.01	2.94	2.90	2.89	2.86
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.85	2.77	2.74	2.73	2.70
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.72	2.65	2.61	2.60	2.57
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.62	2.54	2.51	2.50	2.47
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.53	2.46	2.42	2.41	2.38
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.46	2.39	2.35	2.34	2.31
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.40	2.33	2.29	2.28	2.25
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.35	2.28	2.24	2.23	2.19
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.31	2.23	2.19	2.18	2.15
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.27	2.19	2.15	2.14	2.11
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.23	2.16	2.11	2.11	2.07
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.20	2.12	2.08	2.07	2.04
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.18	2.10	2.05	2.05	2.01
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.15	2.07	2.03	2.02	1.98
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.13	2.05	2.01	2.00	1.96
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.11	2.03	1.98	1.97	1.94
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.09	2.01	1.96	1.96	1.92
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.07	1.99	1.95	1.94	1.90
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.06	1.97	1.93	1.92	1.88
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.04	1.96	1.91	1.91	1.87
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.03	1.94	1.90	1.89	1.85
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.01	1.93	1.89	1.88	1.84
35	4.12	3.27	2.87	2.64	2.49	2.37	2.29	2.22	2.16	2.11	2.07	2.04	1.96	1.88	1.83	1.82	1.79
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.92	1.84	1.79	1.78	1.74

Bibliografia

- ANEEL. (01 de 10 de 2022). Fonte: PEE-Programa de Eficiência Energética:
<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNGI1OGYwOTgtZWQ5YS00Y2I4LTlkOTUtNjl4MDE1Yjk4MjE1IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>
- ANEEL. (01 de 10 de 2022). *OPEE-Observatório Programa de Eficiência Energética*. Fonte: OPEE-Observatório Programa de Eficiência Energética:
<https://siase.aneel.gov.br/WebOpee/>



REALIZAÇÃO



APOIO FINANCEIRO



on the basis of a decision by the German Bundestag