



OS DESAFIOS DA SUBSTITUIÇÃO DE PETROQUÍMICOS FÓSSEIS DIANTE DE CENÁRIOS DE DESCARBONIZAÇÃO DA ECONOMIA MUNDIAL

Gabriel Alexandre Lima Cardoso

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

Orientador(es): Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Rio de Janeiro

Abril de 2024

OS DESAFIOS DA SUBSTITUIÇÃO DE PETROQUÍMICOS FÓSSEIS DIANTE DE
CENÁRIOS DE DESCARBONIZAÇÃO DA ECONOMIA MUNDIAL

Gabriel Alexandre Lima Cardoso

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Aprovada por:

Prof. Alexandre Salem Szklo, D.Sc.

Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo, Ph.D.

Prof. José Vitor Bomtempo Martins, Ph.D.

Prof^a. Suzana Kahn Ribeiro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2024

Cardoso, Gabriel Alexandre Lima

Os desafios da substituição de petroquímicos fósseis diante de cenários de descarbonização da economia mundial / Gabriel Alexandre Lima Cardoso. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XVIII, 205 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Alexandre Salem Szklo

Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 134-153.

1. Descarbonização. 2. Petroquímica. 3. Matéria-prima fóssil. I. Szklo, Alexandre *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

*À Isabela,
que catapultou esta jornada acadêmica,
e à Teresa,
que veio iluminar o fim desta etapa.*

***“There’s a great future in plastics.
Think about it.”***
- Mr. McGuire – The Graduate (1967)

***“Indeed, plastic brings together some of the most abiding environmental concerns of
our time because of its pervasiveness, banality, and longevity.”***
- Heather Davies

***“This land is mine, this land is free
I’ll do what I want yet irresponsibly
It’s evolution, baby”***
- Pearl Jam – Do the Evolution

***“A species set on endless growth is
Un-sus-tain-able!”***
- Muse – The 2nd Law: Unsustainable

***“The answer is that the true ‘output’ of the economic process is not a physical outflow
of waste, but the enjoyment of life.”***
- Nicholas Georgescu-Roegen

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores, Alexandre Szklo e Pedro Rochedo, por todo o suporte, incentivo e troca ao longo deste período. A confiança e o reforço positivo foram essenciais para meu crescimento nestes anos, e esta construção é inestimável. Muito obrigado!

Agradeço ainda aos professores Joana Portugal-Pereira e Roberto Schaeffer, bem como a colega Marianne Zotin pelos incentivos e contribuições, determinantes para meu desenvolvimento acadêmico.

Aos professores Suzana Kahn e José Vitor Bontempo, por aceitarem participar da banca e contribuírem com este trabalho.

A Fabio Fundo e Erick Soares, da SAFE SOLUTIONS pela compreensão e apoio, possibilitando o desenvolvimento do curso de mestrado conjuntamente aos compromissos de trabalho.

Aos meus pais, Ruth e Alexandre por sempre me darem todo o suporte e acolhimento em todas as ocasiões. Ao meu irmão, Danilo, pelo simples fato de me dar orgulho.

À Isabela, sem a qual eu nunca teria sequer iniciado este mestrado, por sempre me empurrar para ser a melhor versão de mim.

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

OS DESAFIOS DA SUBSTITUIÇÃO DE PETROQUÍMICOS FÓSSEIS DIANTE DE CENÁRIOS DE DESCARBONIZAÇÃO DA ECONOMIA MUNDIAL

Gabriel Alexandre Lima Cardoso

Abril/2024

Orientadores: Alexandre Salem Szklo
Pedro Rúa Rodriguez Rochedo

Programa: Planejamento Energético

O Acordo de Paris estabeleceu a meta de limitação do aumento da temperatura média global preferencialmente abaixo de 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Para tanto, é necessário um esforço global de redução das emissões de gases de efeito estufa, através de um processo de descarbonização da economia, como destacado na COP28. Este processo é desafiador dada a dependência do sistema energético com relação às fontes fósseis ao que se soma o fato de que estas mesmas fontes possuem diversos e relevantes usos não-energéticos. Uma das ferramentas utilizadas para analisar estratégias de descarbonização são os Modelos de Avaliação Integrada (IAMs), a partir dos quais foram gerados os Illustrative Mitigation Pathways (IMPs), cenários de referência com diferentes narrativas, apresentados no Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC AR6). Entretanto, mesmo essas complexas ferramentas de modelagem apresentam pouco detalhamento deste nexos material-energia. Esta dissertação visa avaliar em que medida as rotas propostas pelos IMPs são capazes de atender suas respectivas demandas não-energéticas, diante da redução da oferta de matéria-prima fóssil, com foco na cadeia petroquímica. Para tanto, foi realizada uma modelagem da demanda, desde o uso final, estimado a partir de variáveis proxy obtidas de cada um dos cenários analisados, até a demanda equivalente de matéria-prima fóssil. Os resultados indicam que apenas cenários com premissas de redução de demandas materiais atendem as demandas de uso final em rotas de intensa descarbonização, mostrando que estas medidas são necessárias e devem ser promovidas para garantir uma redução consistente do uso de petróleo e gás natural.

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

THE CHALLENGES OF REPLACING FOSSIL PETROCHEMICALS IN FACE OF
DECARBONIZATION SCENARIOS OF THE WORLD ECONOMY

Gabriel Alexandre Lima Cardoso

April/2024

Advisors: Alexandre Salem Szklo
Pedro Rua Rodriguez Rochedo

Department: Energy Planning

The Paris Agreement established the goal of limiting the increase in global average temperature to preferably below 1,5°C over pre-industrial levels. To achieve this goal, a global effort is necessary to reduce greenhouse gas emissions, through the process of decarbonization of the economy, as highlighted at COP28. Given the dependence of the energy sector on fossil fuels, this process proves to be challenging. Added to this is the fact that those same sources have many relevant non-energy uses. One approach adopted by the analysis of decarbonization strategies are the Integrated Assessment Models (IAMs), from which were derived the Illustrative Mitigation Pathways (IMPs), reference scenarios with diverse narratives, presented by the IPCC Sixth Assessment Report (IPCC AR6). However, even those complex modelling tools present a low level of detailment of this material-energy nexus. This dissertation aims to evaluate in what measure the routes proposed by the IMPs can supply their respective non-energy demands, given the reduction in the offer of fossil feedstock, focusing on the petrochemical sector. With that objective, a demand model was developed, from its final use, estimated with the use of proxy variables from each evaluated scenario, through to its corresponding fossil feedstock demand. The results indicate that only pathways with materials demand reduction assumptions are capable of meeting final use demands under high decarbonization pathways, showing that deeper materials policies should be fostered to consistently reduce the use of oil and gas.

Sumário

1	Introdução.....	1
2	Indústria Petroquímica.....	6
2.1	A Origem Fóssil.....	7
2.2	Químicos Básicos	8
2.2.1	Etileno.....	10
2.2.2	Propileno.....	11
2.2.3	Butilenos e outros C ₄	11
2.2.4	Aromáticos	13
2.2.5	Amônia	14
2.2.6	Metanol.....	15
2.3	Principais Aplicações.....	15
2.3.1	Plásticos.....	16
2.3.2	Fertilizantes nitrogenados.....	21
2.3.3	Aditivos e componentes de combustíveis.....	22
2.3.4	Solventes.....	23
2.3.5	Explosivos	24
2.4	Impactos Ambientais	24
2.4.1	Emissões de GEE	24
2.4.2	Poluição Atmosférica.....	26

2.4.3	Resíduos e Descarte.....	27
2.4.4	Poluição de Corpos Hídricos.....	30
2.5	Alternativas ao uso dos fósseis.....	31
2.5.1	Matérias-Primas Alternativas.....	32
2.5.2	Reciclagem.....	40
2.5.3	Soluções de Redução de Demanda.....	44
3	Metodologia.....	48
3.1	Dados Históricos e Detalhamento das Cadeias de Produtos.....	51
3.1.1	Termoplásticos.....	51
3.1.2	Fibras Sintéticas.....	58
3.1.3	Fertilizantes Nitrogenados.....	60
3.1.4	Aditivos e componentes de combustíveis.....	61
3.1.5	Demais aplicações.....	63
3.2	Intensidades Materiais e Projeção das Demandas Setoriais.....	67
3.3	Demanda de Químicos Básicos.....	70
3.4	Demanda de Matéria-Prima Fóssil.....	74
3.4.1	Metanol e Amônia.....	75
3.4.2	HVCs.....	78
3.5	Saídas do Modelo.....	81
3.6	Descrição dos Cenários.....	82
3.6.1	<i>Accelerated Renewables: IMP-Ren</i>	82

3.6.2	<i>Low Energy Demand: IMP-LD</i>	84
3.6.3	<i>Emphasis on Net Negative Emissions: IMP-Neg</i>	87
3.6.4	<i>Focus on Shifting Development Pathways: IMP-SP</i>	89
3.6.5	<i>Gradual Strengthening: IMP-GS</i>	91
4	Resultados e Discussão.....	95
4.1	Resultados.....	95
4.1.1	IMP-Ren	95
4.1.2	IMP-LD	99
4.1.3	IMP-Neg.....	102
4.1.4	IMP-SP	105
4.1.5	IMP-GS.....	108
4.2	Discussão	111
4.2.1	Integração refino-petroquímica e limites de conversão.....	111
4.2.2	Defasagem de Olefinas e Aromáticos.....	119
4.2.3	Modelagem Petroquímica em IAMs	124
5	Conclusões.....	129
5.1	Limitações da Análise e Sugestões de Trabalhos Futuros	132
6	Referências Bibliográficas.....	134
ANEXO I	Informação Complementar.....	151
ANEXO II	Resultados Adicionais.....	172

Lista de Figuras

Figura 1 - Estrutura Geral do Modelo Proposto Elaboração Própria	50
Figura 2 – Demanda Global de Termoplásticos por Região. ARF: África, AUS: Austrália e Nova Zelândia, BRA: Brasil, CAM: América Central, CAN: Canadá, CAS: Região do Mar Cáspio, CHN: China, EEU: Europa Ocidental, IND: Índia, JPN: Japão, KOR: Coreia do Sul, MEA: Oriente Médio, RAS: Resto da Ásia, RUS: Rússia, SAF: África do Sul, SAM: América do Sul, USA: Estados Unidos da América, WEU: Europa Oriental. Detalhes sobre as regiões no ANEXO I. Elaboração Própria	52
Figura 3 – Demanda Global de Termoplásticos por Setor de Uso Final. Elaboração Própria.....	53
Figura 4 – Demanda Global de Termoplásticos por Polímero. PET: Polietileno Tereftalato, HDPE: Polietileno de Alta Densidade, PVC: Cloreto de Polivinila, LDPE: Polietileno de Baixa Densidade, PP: Polipropileno, PS: Poliestireno Elaboração Própria	56
Figura 5 – Demanda Global de Fibras Sintéticas Elaboração Própria baseada em (OPPERSKALSKI et al., 2022).....	59
Figura 6 – Consumo Global de Fertilizantes Nitrogenados Elaboração Própria baseada em (FAO, 2023)	60
Figura 7 – Produção Global de MTBE Elaboração Própria baseada em (STATISTA, 2023).....	62
Figura 8 – Procedimento para estimativa das Demandas Setoriais Fonte: Elaboração própria.....	70

Figura 9 – Procedimento para estimativa das Demandas de Químicos Básicos	Fonte:	
Elaboração própria		74
Figura 10 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-Ren		
Fonte: Elaboração própria		96
Figura 11 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico –		
IMP-Ren	Fonte: Elaboração própria	97
Figura 12 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor		
petroquímico – IMP-Ren	Fonte: Elaboração própria.....	97
Figura 13 – Demanda não-energética de gás natural para termoplásticos utilizados		
na produção de geradores eólicos, fotovoltaicos e veículos elétricos – IMP-Ren		
Fonte: Elaboração própria		98
Figura 14 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para termoplásticos		
utilizados na produção de geradores eólicos, fotovoltaicos e veículos elétricos – IMP-		
Ren	Fonte: Elaboração própria	99
Figura 15 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-LD		
Fonte: Elaboração própria		100
Figura 16 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico –		
IMP-LD	Fonte: Elaboração própria.....	101
Figura 17 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor		
petroquímico – IMP-LD	Fonte: Elaboração própria.....	101
Figura 18 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-Neg		
Fonte: Elaboração própria		103
Figura 19 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico –		
IMP-Neg	Fonte: Elaboração própria.....	104

Figura 20 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico – IMP-Neg Fonte: Elaboração própria.....	104
Figura 21 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-SP Fonte: Elaboração própria	106
Figura 22 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico – IMP-SP Fonte: Elaboração própria.....	107
Figura 23 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico – IMP-SP Fonte: Elaboração própria	107
Figura 24 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-GS Fonte: Elaboração própria	109
Figura 25 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico – IMP-GS Fonte: Elaboração própria	110
Figura 26 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico – IMP-GS Fonte: Elaboração própria	110
Figura 27 - Exemplo de Integração Refino-Petroquímica Fonte: Elaboração própria, baseado em (GELDER, 2021).....	114
Figura 28 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-Ren.....	120
Figura 29 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-LD	120
Figura 30 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-Neg	121
Figura 31 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-SP	121

Figura 32 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-GS 122

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Participações dos compostos associadas aos setores de uso final.....	57
Tabela 2 – Participação média dos outros compostos da cadeia dos termoplásticos	57
Tabela 3 – Participação dos comportos associada aos geradores eólicos e fotovoltaicos.....	58
Tabela 4 – Participações dos polímeros e demais compostos para as fibras sintéticas (LEVI; CULLEN, 2018; OPPERSKALSKI et al., 2022).....	59
Tabela 5 – Participação dos compostos nos Fertilizantes Nitrogenados e teores de N (FAO, 2023; IFA, 2023)	61
Tabela 6 – Participação das demais aplicações na Cadeia Petroquímica (LEVI; CULLEN, 2018)	63
Tabela 7 – Participação dos compostos considerados para as resinas termofixas (LEVI; CULLEN, 2018).....	63
Tabela 8 – Participação dos compostos considerados para os elastômeros (LEVI; CULLEN, 2018)	64
Tabela 9 – Participação dos compostos considerados para os solventes (LEVI; CULLEN, 2018)	64
Tabela 10 – Participação dos compostos considerados para os demais produtos da cadeia petroquímica (LEVI; CULLEN, 2018)	65
Tabela 11 – Demandas para as aplicações do setor petroquímico (LEVI; CULLEN, 2018).....	67
Tabela 12 – Compostos considerados no fluxo material	71

Tabela 13 – Participação das Matérias-Primas fósseis na produção de Amônia e Metanol (LEVI; CULLEN, 2018)	75
Tabela 14 – razões mássicas $r_{i,j}$	76
Tabela 15 – Propriedades dos componentes do gás de síntese e das matérias-primas (LEVI; CULLEN, 2018).....	77
Tabela 16 – Participação das Matérias-Primas fósseis no parque global de craqueamento a vapor (GELDER, 2023)	78
Tabela 17 – Perfil de similaridade das outras matérias-primas aplicado na modelagem (KOOTTUNGAL, 2015).....	79
Tabela 18 – Rendimento das diferentes cargas de alimentação de Craqueadores a Vapor (AKAH; AL-GHRAMI, 2015).....	79
Tabela 19 – Participação de cargas na produção de HVCs (Elaboração própria) .	80
Tabela 20 – Participação de cargas na produção de HVCs (KULPRATHIPANJA et al., 2021).....	81
Tabela 21 – Variáveis <i>proxy</i> selecionadas para o IMP-Ren.....	83
Tabela 22 – Variáveis <i>proxy</i> selecionadas para o IMP-LD.....	85
Tabela 23 – Fatores k_{2050} IMP-LD.....	86
Tabela 24 – Variáveis <i>proxy</i> selecionadas para o IMP-Neg.....	88
Tabela 25 – Participação da Biomassa na demanda não-energética.....	88
Tabela 26 – Variáveis <i>proxy</i> selecionadas para o IMP-SP.....	90
Tabela 27 – Variáveis <i>proxy</i> selecionadas para o IMP-GS.....	92
Tabela 28 – Variação do PIB per capita ao longo do tempo para os cenários analisados [10^3 US\$/hab].....	108
Tabela 29 – Participação das demandas não-energéticas de derivados de petróleo sobre a oferta de energia primária para os 5 IMPs.....	116

Tabela 30 – Participação das demandas não-energéticas de gás natural sobre a oferta de energia primária para os 5 IMPs	119
---	------------

1 Introdução

O acordo do clima de Paris, adotado na COP 21 em dezembro de 2015, propôs a meta de limitação do aquecimento global abaixo de 2°C, preferencialmente limitada a 1,5°C, comparado aos níveis pré-industriais. Para cumprir com este objetivo, os países signatários se comprometeram a apresentar seus planos de ação climática através de suas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, na sigla em inglês), bem como estratégias de longo termo para redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs)¹ (UNFCCC, 2016). Entretanto, estudos apontam que as propostas apresentadas até o momento são insuficientes para que esta meta seja alcançada (LECOCQ et al., 2023; ROELFSEMA et al., 2020; ROGELJ et al., 2016, 2023). Em sua quarta edição, o *Production Gap Report* aponta que, de forma geral, os planos governamentais de produção de combustíveis fósseis até 2030 somam mais do que o dobro do que seria consistente com a limitação do aquecimento global em 1,5°C. De fato, são previstos crescimentos na produção de carvão até 2030 e de óleo e gás até pelo menos 2050, em conflito com as expectativas de pico de demanda para todos estes combustíveis ainda esta

¹ As conferências subsequentes iniciaram as discussões de operacionalização do Acordo de Paris com foco em questões relacionadas a capacitação, compensações por perdas e danos, adaptação e financiamento climáticos (COP22) (UNFCCC, 2017). A COP23 contou com a inclusão de plataformas para comunidades locais, indígenas e políticas voltadas a gênero no âmbito das ações climáticas bem como identificação de impactos das mudanças climáticas nas atividades agrícolas e segurança alimentar (UNFCCC, 2018). A COP 24 inseriu o programa de medidas de resposta a emergências climáticas (UNFCCC, 2019). A COP25 reforça a necessidade de tomada de decisões baseadas na ciência, reconhecendo o papel do IPCC, chama a atenção para a importância da manutenção dos oceanos e sistemas costeiros no contexto das mudanças climáticas (UNFCCC, 2020). A COP26 inclui a necessidade da redução de emissão de GEE além do CO₂, com destaque para o metano, solicita a rápida transição para a transição para sistemas energéticos de baixa emissão, incluindo esforços para redução progressiva do uso energético do carvão sem abatimentos e eliminação de subsídios ineficientes aos combustíveis fósseis (UNFCCC, 2022). A COP27 teve grande foco em perdas e danos com a criação de um fundo para países em desenvolvimento vítimas de desastres climáticos, e solicitando atenção a necessidade de ampliação, em escala global, da observação e aviso prévio de eventos climáticos extremos, em especial para regiões vulneráveis para mitigação de seus impactos (UNFCCC, 2023a). Finalmente, a COP28 sinaliza pela primeira vez a necessidade de realizar uma transição se afastando dos combustíveis fósseis nos sistemas energéticos, porém sem definição de prazos ou metas (UNFCCC, 2023b).

década. Em especial com relação ao gás natural, a guerra na Ucrânia resultou em uma pressão no fornecimento global, que associada aos altos preços alcançados por esse energético no mercado internacional, estimularam ainda mais investimentos de infraestrutura de importação e exportação (SEI et al., 2023).

Modelos de Avaliação Integrada (*Integrated Assessment Models* - IAMs) têm sido amplamente utilizado para projetar possíveis estratégias que contribuam para que estas metas sejam alcançadas (BERGMAN-FONTE et al., 2023; DROUET et al., 2021; ROCHEDO et al., 2018; ROELFSEMA et al., 2022; ROGELJ et al., 2015; SKEA et al., 2021). No Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC), o Grupo de Trabalho III apresentou cinco Cenários Ilustrativos de Mitigação (IMPs), selecionados a partir de um universo superior a 2000 estudos submetidos. Cada um destes IMPs apresenta caminhos possíveis para mitigação das emissões de GEEs, guiando o desenvolvimento da sociedade rumo a um futuro alinhado a meta do Acordo de Paris (SHUKLA et al., 2022). Todos os IMPs apresentam em comum o reconhecimento da necessidade de redução da utilização de combustíveis fósseis, em maior ou menor grau, ao longo dos horizontes temporais analisados (ACHAKULWISUT et al., 2023). Esta tendência está diretamente atrelada a inserção de fontes renováveis no setor de geração de energia bem como da eletrificação em larga escala do setor de transportes (SHUKLA et al., 2022). Importante ressaltar que o consenso sobre a redução do consumo de combustíveis fósseis no sistema energético foi corroborado pela primeira vez, ainda que sem metas explícitas quanto a prazos e intensidades, pela COP28 (UNFCCC, 2023b).

Muita atenção é dada às possíveis restrições nas cadeias de suprimentos de materiais críticos sob uma perspectiva de transição energética (GERVAIS et al., 2021; LIANG et

al., 2022; LO PIANO; SALTELLI; VAN DER SLUIJS, 2019; WANG et al., 2022; ZENG et al., 2022). Porém um aspecto pouco explorado no contexto de redução das emissões de carbono é o conceito do “óleo embutido”² (ACHARYA et al., 2022), isto é, a dependência de combustíveis fósseis para a produção e manutenção de uma gama de produtos de uso cotidiano, com grande destaque, mas não limitados, a materiais poliméricos e fertilizantes. Essas duas classes de produtos, em particular, apresentam expectativas de grande crescimento nas próximas décadas. Uma projeção de aumento populacional alcançando 9 bilhões de pessoas ao final do século acarreta diretamente em um aumento na demanda de alimentos, que, por sua vez, representa um potencial aumento do consumo de fertilizantes para sua produção, seja para consumo direto humano, seja para provisionamento de ração animal (MBOW et al., 2022). Além disso, grande parte deste aumento populacional se dará em regiões de baixa e média renda, onde existe a expectativa de aumento da urbanização e qualidade de vida, acarretando num maior consumo de materiais básicos per capita (IEA, 2018), incluindo os diversos tipos de materiais poliméricos e demais produtos da cadeia petroquímica, como solventes e explosivos. Assim, a compreensão da evolução da demanda destes produtos se torna indispensável para a avaliação da viabilidade da redução da produção de materiais fósseis almejada nos IMPs.

Este trabalho propõe desenvolver e aplicar um modelo de simulação, para estimativa das demandas não-energéticas de matéria-prima fóssil (carvão, petróleo e gás natural), com base nas demandas materiais de setores de uso final, como embalagens, construção civil, automotivo e eletroeletrônicos para os termoplásticos, além das principais aplicações do setor petroquímico, como fertilizantes, aditivos, solventes e explosivos. O modelo utiliza

² “*embedded oil*” no termo original em inglês.

projeções de cenários pré-existentes desenvolvidos com IAMs, para investigar em que medida as reduções de consumo de combustíveis fósseis nestes cenários estão alinhadas com as projeções de crescimento dos setores finais sob um ponto de vista de demanda material. Assim, esta dissertação tem como objetivo avaliar a factibilidade dos IMPs apresentados no AR6 do IPCC sob o viés da demanda material para o setor petroquímico tendo em vista as restrições da oferta de combustíveis fósseis projetadas em cada cenário. A não-factibilidade destes cenários corroboraria a hipótese da necessidade do fomento de políticas associadas a redução e substituição do uso de matéria-prima virgem de origem fóssil no setor petroquímico.

Bons modelos já foram desenvolvidos na literatura com o intuito de modelar o setor petroquímico a partir do viés da oferta, tanto de forma isolada (SAYGIN; GIELEN, 2021) quanto inseridos em IAMs (DE OLIVEIRA et al., 2021b; LAP et al., 2019; STEGMANN et al., 2022). Apesar da rica representação setorial alcançada nestes modelos, a necessidade de determinação de uma demanda material exógena, em geral a partir de expectativas de taxa de crescimento do setor petroquímico, não permite uma associação direta entre a demanda de matéria-prima fóssil para este setor e as demandas efetivas dos setores de uso final aos quais se pretende atender com seus produtos. Esta dissertação vem por meio desta modelagem cobrir este elo faltante entre os usos finais pretendidos pelos produtos petroquímicos e o quantitativo associado de matérias-primas necessárias para seu atendimento.

Esta dissertação se estrutura em cinco capítulos. Após esta introdução, o capítulo 2 apresenta uma descrição da Indústria Petroquímica, com foco na descrição de suas matérias-primas, dos químicos básicos, o pequeno grupo de compostos dos quais derivam a cadeia de milhares de produtos derivados do setor, principais aplicações destes produtos,

seus principais impactos ambientais e alternativas ao uso da matéria-prima fóssil. O capítulo 3 apresenta a descrição do modelo desenvolvido e a metodologia utilizada na análise e uma breve descrição dos cenários selecionados e seus respectivos IAMs. O capítulo 4 apresenta os resultados da aplicação do modelo aos IMPs e elabora uma discussão sobre eles. Finalmente, o capítulo 5 apresenta a conclusão da dissertação, incluindo as limitações do modelo proposto e propostas para trabalhos futuros. O ANEXO I apresenta dados complementares usados na elaboração do modelo, enquanto o ANEXO II apresenta resultados adicionais do estudo de caso.

2 Indústria Petroquímica

A indústria petroquímica compõe um subconjunto da indústria química, que, por sua vez, faz parte da chamada indústria da transformação, partindo de matérias-primas originárias de outros setores industriais para a produção de bens de capital ou de consumo final ou mesmo bens intermediários que servem como insumos para etapas de processamento posteriores.

Como o próprio nome do setor sugere, as matérias-primas tradicionalmente utilizadas na petroquímica são derivadas do petróleo ou do gás natural. É exatamente a natureza de suas principais fontes de matéria-prima que tornam este setor ímpar ante um contexto de descarbonização da economia. Ao contrário da quase totalidade³ dos demais consumidores de combustíveis fósseis, a principal finalidade deste material na cadeia petroquímica é o seu uso não-energético, no qual os hidrocarbonetos contidos nos seus variados insumos, são convertidos em plásticos, fertilizantes, solventes, fibras têxteis, elastômeros, aditivos, explosivos dentre outros produtos (LEVI; CULLEN, 2018).

As seções a seguir apresentam um panorama da indústria, abordando as matérias-primas utilizadas e suas principais fontes, os químicos básicos, componentes chave da indústria, que são o ponto de partida para a fabricação dos mais diversos produtos ao longo da cadeia petroquímica, principais produtos, bem como os impactos ambientais do setor, inclusive com a destinação final de seus produtos, e alternativas ao uso de matéria-prima de origem fóssil.

³ Existem produtos derivados do petróleo com usos não-energéticos que não compõem a cadeia petroquímica, sendo obtidos diretamente do refino do petróleo, com destaque para os lubrificantes e asfaltos.

2.1A Origem Fóssil

O setor petroquímico é responsável pela segunda maior demanda primária de petróleo em base energética, consumindo aproximadamente 14% do total, ficando atrás apenas do consumo de combustíveis líquidos para o setor de transporte, que representa algo em torno de 60% da demanda global. De forma similar, a demanda energética de gás natural do setor petroquímico fica em terceiro lugar globalmente (aproximadamente 8%), ficando atrás apenas dos setores de geração elétrica (40%) e da demanda por aquecimento de água e condicionamento térmico de edifícios (21%). Desta demanda, 90% são direcionados para a produção de químicos básicos (IEA, 2018).

Dentro da cadeia petroquímica, os combustíveis fósseis podem ser utilizados para fins energéticos, como nos demais setores industriais, para fornecimento de energia, seja ela na forma de calor, vapor ou eletricidade. Porém, o que caracteriza este setor, é o uso não-energético destes combustíveis, utilizados como matéria-prima para produção de bens materiais. Este uso representa pouco menos de 60% do consumo de energia fóssil do setor, percentual que vem crescendo consistentemente ao longo dos anos devido aos ganhos de eficiência e integração no consumo energético de combustíveis (IEA, 2018).

Atualmente, os derivados de petróleo (nafta e gasóleo) representam aproximadamente 40% da alimentação do parque global de reatores de craqueamento a vapor, o coração da indústria petroquímica, onde são produzidos os químicos de alto valor (HVCs de *High Value Chemicals*, no termo original). Destes, 35% são nafta e apenas 5% gasóleos. O etano, obtido a partir do fracionamento de líquidos de gás natural (LGN), corresponde a 39% da alimentação dos craqueadores, enquanto o gás liquefeito de petróleo (GLP), que pode ser obtido tanto do fracionamento de LGN, quanto, em menor grau, das refinarias

de petróleo, corresponde a 17%. Os 4% restantes correspondem a outros insumos utilizados como alimentação para os craqueadores, que podem variar de hidrocarboneto leve de refinaria⁴ até ceras e resíduos (GELDER, 2023; KOOTTUNGAL, 2015). Estes produtos líquidos representam cumulativamente 74% da matéria-prima, em base energética, do setor desde 1970 (IEA, 2018).

O gás natural seco⁵ é utilizado majoritariamente para a produção de metanol e amônia, numa razão aproximada de 1:3 entre estes dois produtos. O carvão, utilizado em uma escala muito menor do que os demais fósseis, é empregado também para produção de metanol e amônia, distribuído equanimemente entre os dois produtos. O gás natural e o carvão correspondem a acumulados históricos de 25% e 1%, respectivamente, da matéria-prima utilizada no setor desde 1970, em base energética (IEA, 2018).

2.2 Químicos Básicos

Apesar da grande complexidade da cadeia de produção do setor petroquímico, que envolve milhares de produtos e compostos intermediários, poucos compostos básicos compõem toda a sua base. São eles, as olefinas (etileno, propileno, butilenos e outros compostos da família C₄), os aromáticos (benzeno, tolueno e xilenos, chamados em conjunto de BTX), amônia e metanol. O grupo de olefinas e aromáticos é comumente chamado de químicos de alto valor, os HVCs já mencionados acima (IEA, 2018).

O processo de craqueamento a vapor se baseia em reações de pirólise da matéria-prima diluída em vapor superaquecido. A pirólise consiste na quebra das moléculas sob alta

⁴ O Hidrocarboneto Leve de Refinaria (HLR), como o nome indica, também deriva do petróleo. Essa corrente é constituída de até dois átomos de carbono e é gerada nos processos de FCC e Coqueamento Retardado. Essa corrente é aproveitada tanto no Brasil (ex. REVAP) (PETROBRAS, acessado em 14/02/2024) quanto na Europa e Estados Unidos (AL-QAHTANI; ELKAMEL, 2009).

⁵ Gás natural com alto teor de metano e poucos LGNs, também chamado de gás natural pobre (CNI, 2019).

temperatura, tratando-se, portanto, de um processo altamente endotérmico. Esse processo é favorecido sob pressões mais baixas, daí o uso do vapor d'água superaquecido para redução das pressões parciais dos hidrocarbonetos (MATAR; F. HATCH, 2000). Independente da matéria-prima utilizada, o principal produto do processo de craqueamento a vapor é o etileno. O rendimento total de HVCs e a variedade de produtos obtidos é altamente dependente da matéria-prima. Como regra geral, matérias-primas mais leves proveem maiores rendimentos totais de HVCs, com favorecimento da proporção de etileno (IEA, 2018; MATAR; F. HATCH, 2000).

Assim, a seleção da matéria-prima é fundamental para a definição do mix de produtos obtidos. Entretanto, diversos fatores impactam nesta seleção, como custos de capital e de produção e regulação ambiental, porém a acessibilidade aos diferentes tipos de matéria-prima tem um peso fundamental nesta seleção. Assim, temos que nos Estados Unidos, desde o aumento da produção do gás de folhelho a partir de 2011, e no Oriente Médio, a produção de HVCs é dominada pelo uso de etileno e GLP. A Europa, por sua vez, depende muito mais da nafta petroquímica. A Ásia também apresenta um grande uso de nafta como matéria-prima, porém, a China apresenta uma grande peculiaridade regional. Devido à baixa disponibilidade de LNG e a abundância de carvão, existe uma grande produção de químicos baseados em carvão. Em uma primeira etapa, o carvão é utilizado para produção de metanol, que posteriormente é processado em olefinas através do processo MTO (*methanol-to-olefins*). (IEA, 2018; LEVI; CULLEN, 2018)

A amônia e o metanol são obtidos a partir de processos que utilizam o gás de síntese obtido a partir da reforma, sobretudo, do gás natural. A amônia é obtida a partir do processo de Haber-Bosch, no qual o H₂ produzido no gás de síntese reage com nitrogênio atmosférico. O metanol é produzido majoritariamente através de reação catalítica do gás

de síntese. Novamente, a exceção é a China, onde ambos são produzidos em grande escala a partir da gaseificação do carvão (IEA, 2018; LEVI; CULLEN, 2018; MATAR; F. HATCH, 2000). As próximas seções apresentam mais detalhadamente estes químicos básicos e todos os percentuais de produção e uso são se encontram em base mássica.

2.2.1 Etileno

O eteno, comumente chamado etileno, é um alceno extremamente reativo que se apresenta como um gás incolor e de odor adocicado em condições ambientes. Além de ser o monômero do polietileno, o termoplástico de maior consumo global, é um importante precursor dos monômeros cloreto de vinila e estireno. Sua estrutura simples e alta reatividade possibilita a obtenção de diversos produtos de alto valor a partir de reações com reagentes de baixo custo, como água e oxigênio (MATAR; F. HATCH, 2000).

Conforme mencionado anteriormente, a principal rota de produção de etileno se dá através do craqueamento a vapor de hidrocarbonetos, equivalente a aproximadamente 96% da produção. O restante é obtido através de rotas de MTO ou CTO (“coal to olefins”) primordialmente na China (KULPRATHIPANJA et al., 2021).

O uso do etileno é dominado pela produção de polietileno, representando aproximadamente 62% do consumo deste químico básico. Em seguida temos a produção de óxido de etileno (15%), 1,2-Dicloroetano (9%) e etilbenzeno (5%). Os 9% restantes são dispersos na produção de diversos produtos e intermediários ao longo da cadeia petroquímica. A principal aplicação do polietileno é na produção de embalagens descartáveis para alimentos, e o crescente movimento no sentido de redução deste tipo de

consumo pode acarretar impactos na cadeia do etileno no futuro (KULPRATHIPANJA et al., 2021).

2.2.2 Propileno

O propeno, comumente chamado propileno, é outro alceno leve de alta reatividade, contendo uma cadeia de três átomos de carbono. Segundo intermediário mais produzido, além de base para o polipropileno, segundo termoplástico de maior consumo, serve de base para outros intermediários importantes para o setor de fibras sintéticas. (MATAR; F. HATCH, 2000)

Além de ser coproduto do etileno no craqueamento a vapor, rota que corresponde a aproximadamente 47% da origem deste composto, outra fonte importante desta olefina é o processo de craqueamento catalítico de leito fluidizado (FCC) das refinarias, de onde são obtidos outros 29% de sua produção (KULPRATHIPANJA et al., 2021). Isso revela que 76% da produção de propileno é recuperada na forma de coproduto a partir de processos direcionados para a produção de outros compostos (etileno e gasolina). De maneira análoga ao etileno, o principal uso do propileno se dá na produção de polipropileno, correspondendo a 67% de sua demanda global. Outras demandas representativas são a produção de óxido de propileno (8%), acrilonitrila, oxo-álcoois e cumeno (6% cada). O restante é utilizado na produção de ácido acrílico e outros compostos produzidos em menor quantidade (KULPRATHIPANJA et al., 2021).

2.2.3 Butilenos e outros C₄

Assim como o propileno, os butenos, comumente chamados de butilenos, são coproduzidos tanto nos processos de craqueamento nas refinarias como no craqueamento

a vapor para obtenção do etileno. Existem 4 isômeros do composto, 1-buteno, cis-2-buteno e trans-2-buteno e o isobuteno, de cadeia ramificada. Como muitos produtos podem ser obtidos através de reações com qualquer um dos isômeros de cadeia simples, é comum utilizar o processo de isomerização para obtenção de 2-butenos (cis e trans), que podem ser mais facilmente separados do isobuteno. Outro composto importante da família C₄ é o butadieno, no qual estão presentes duas ligações duplas entre os carbonos da cadeia, também gerado no craqueamento a vapor. De forma análoga ao propileno, todos estes compostos podem ser obtidos a partir de uma rota dedicada de desidrogenação do butano (BDH). (MATAR; F. HATCH, 2000).

A principal fonte de butilenos é o FCC das refinarias, somando aproximadamente 45% da oferta, seguido pelo craqueamento a vapor (18%) e BDH (15%). O restante é obtido como subproduto de diversos processos na cadeia de produção química. (KULPRATHIPANJA et al., 2021)

A demanda de butilenos é dividida quase equitativamente entre os normais e isobutenos, sendo que aproximadamente 80% desta demanda decorrem de seu uso na cadeia de combustíveis em produtos alquilados para aumento de octanagem da gasolina ou na produção de éteres como MTBE, ETBE e TAME, que trazem melhorias tanto na octanagem dos combustíveis como no processo de combustão, reduzindo a emissão de poluentes (KULPRATHIPANJA et al., 2021). Vale destacar que apesar da proibição do uso do MTBE em grande parte dos Estados Unidos, Canadá e Japão, na primeira década deste século, seu consumo ainda é importante na China, Europa, Oriente Médio e África, ficando atrás apenas do etanol como composto mais utilizado para melhoria de octanagem da gasolina no mundo (S&P GLOBAL, 2022b; S&P GLOBAL COMMODITY INSIGHTS, 2022). O uso petroquímico dos butilenos está associado aos processos de

produção de propileno através da metátese (MTS) mencionada anteriormente, de monometil metacrilato (MMA), poliisobutileno (PIB), ácido acético, anidrido acético, anidrido maleico, óxido de butileno, metacroleína e ácido metacrílico (KULPRATHIPANJA et al., 2021; MATAR; F. HATCH, 2000).

O butadieno, por sua vez possui uso exclusivamente petroquímico, sendo a principal matéria-prima para borrachas sintéticas, correspondendo a 72% de seu uso final. Dentre os demais usos, destaca-se a produção do polímero de alta performance acrilonitrila-butadieno-estireno, ABS, com 12% da demanda global. (KULPRATHIPANJA et al., 2021) Outros produtos incluem intermediários como adiponitrila, hexametilendiamina, ácido adípico, butanodiol e cloropreno (MATAR; F. HATCH, 2000).

2.2.4 Aromáticos

Benzenos, toluenos e xilenos (BTX), em conjunto com etilbenzeno são os principais compostos aromáticos utilizados na cadeia petroquímica. Apolares, apresentam grande solubilidade em compostos orgânicos como hexanos, éter dietílico e tetracloreto de carbono. Na indústria, os solventes mais utilizados em sua extração são o sulfoleno e o etilenoglicol. (MATAR; F. HATCH, 2000)

As principais fontes de benzeno são a reforma da nafta nas refinarias (39%), a gasolina de pirólise obtida no craqueamento a vapor (32%), como subproduto das reações de transalquilação para a produção de p-xileno (17%), coqueamento do carvão mineral (8%). O restante é obtido do processo de hidrodealquilação (HDA), em geral utilizando tolueno, onde se obtém benzeno e metano como produtos. Os principais usos do benzeno são a produção de etilbenzeno (50%), cumeno (21%), ciclohexano (11%) e nitrobenzeno (9%),

além de outros produtos utilizados nas cadeias de corantes, herbicidas, revestimentos e surfactantes. (KULPRATHIPANJA et al., 2021)

A maior parte do tolueno extraído nos processos industriais é originário da reforma da nafta nas refinarias (77%) e da gasolina de pirólise do craqueamento a vapor (18%) com o restante sendo obtido a partir de coqueamento do carvão e outros processos menores. A principal demanda do tolueno é a produção de p-xileno no processo de transalquilação (47%), seguido do uso para mistura no pool de gasolina (28%), produção de solventes (18%) e tolueno diisocianato (5%). Outros compostos derivados do tolueno são o ácido benzóico, caprolactama, importante precursor do náilon 6, ácido tereftálico e trinitrotolueno (TNT). (KULPRATHIPANJA et al., 2021; MATAR; F. HATCH, 2000)

A produção de xilenos está diretamente atrelada a demanda de poliésteres, em especial polietileno tereftalato (PET), através dos intermediários ácido tereftálico ou dimetil tereftalato. Estes compostos são utilizados ainda na produção de anidrido ftálico e ácido isoftálico. (KULPRATHIPANJA et al., 2021; MATAR; F. HATCH, 2000)

2.2.5 Amônia

A amônia é o principal produto, em termos quantitativos, derivado do uso do gás de síntese. O hidrogênio do gás de síntese é utilizado na reação de Haber-Bosch com nitrogênio atmosférico para sua produção. O principal uso da amônia é a produção de fertilizantes (81%) em especial na forma de ureia, mas também podendo ser utilizado em outras formas, inclusive diretamente como amônia anidra. Outro uso importante é a produção de ácido nítrico, representando 10% da demanda global. Outro produto de destaque da cadeia da amônia é a hidrazina, com usos diversos, desde combustível para

propulsão de foguetes, até formulação de produtos da indústria farmacêutica e agrícola. (KULPRATHIPANJA et al., 2021; MATAR; F. HATCH, 2000)

2.2.6 Metanol

O segundo maior consumidor de gás de síntese é o metanol. Este composto é obtido a partir de uma reação catalítica do gás de síntese, com uma razão estequiométrica CO:H₂ de 1:2. Como a razão obtida na reforma do gás natural é de aproximadamente 1:3, é necessária a adição de CO para compensar o excesso de hidrogênio. Uma forma alternativa e energoeiciente de atingir esta razão se dá através da combinação do processo de reforma a vapor com a reforma autotérmica, que alcança razões da ordem de 1:2,05. Os principais usos do metanol são para a produção de aditivos para a gasolina (29%) – sendo sua aplicação direta para melhoria de octanagem importante na China, tornando-o o terceiro composto mais consumido para esta finalidade globalmente - (S&P GLOBAL, 2022b), formaldeído (27%), olefinas (19%), especialmente devido a produção Chinesa derivada do carvão, ácido acético (8%) e solventes (4%). Outros produtos da cadeia do metanol incluem cloreto de metila e metilaminas (KULPRATHIPANJA et al., 2021; MATAR; F. HATCH, 2000).

2.3 Principais Aplicações

Os produtos da cadeia petroquímica podem ser divididos em grandes classes de acordo com suas aplicações: materiais poliméricos representam aproximadamente 41% deste total (28% dos termoplásticos, 7% fibras sintéticas, 5% resinas termofixas e 1% de elastômeros), seguidos dos fertilizantes nitrogenados (34%), aditivos e componentes de mistura de combustíveis (8%), solventes (2%) e explosivos (2%). Existem ainda uma

gama diversa de pequenas cadeias de produtos que somados cobrem os 13% restantes da cadeia produtiva. (LEVI; CULLEN, 2018)

2.3.1 Plásticos

O dicionário Michaelis define matéria plástica como “matéria sintética de extrema maleabilidade, cujo constituinte principal é um polímero, e que serve de matéria-prima para a fabricação de diversos utensílios” (TREVISAN, 2015). O termo polímero, por sua vez vem do grego “poly” que significa muitos e “meros” que significa partes. Desta forma, os polímeros podem ser definidos como macromoléculas compostas por uma série de pequenas partes (os monômeros) ligadas em cadeia. O histórico que se segue é baseado principalmente em (GILBERT, 2017).

A primeira tentativa de explorar comercialmente um polímero modificado quimicamente se deu em 1862, a partir da apresentação pública do Parkesine na Grande Exposição Internacional em Londres (GILBERT, 2017; RASMUSSEN, 2021). Pouco tempo depois, nos Estados Unidos, foi desenvolvido o celuloide, a partir de nitrato de celulose e cânfora, como um substituto para produtos derivados do marfim. Ao contrário do Parkesine, o celuloide foi um grande sucesso comercial e até hoje ainda pode ser encontrado na produção de alguns itens de uso comum (BAKER, 2018; GILBERT, 2017).

Na primeira década do século XX, Hendrik Baekland patenteia o primeiro plástico baseado na mistura fenol-aldeído, o Baquelite. Enquanto o celuloide foi o primeiro material plástico obtido a partir da modificação química de um polímero natural a ser explorado comercialmente de forma bem sucedida, o Baquelite foi o primeiro plástico completamente sintético a alcançar esta escala (CRESPY; BOZONNET; MEIER, 2008; GILBERT, 2017).

Na década de 1930, foram desenvolvidos em escala industrial alguns dos principais termoplásticos utilizados na atualidade, como poliestireno (PS), cloreto de polivinila (PVC), polietileno (PE) e polimetilmetacrilato (PMMA). Também foram desenvolvidas as primeiras fibras sintéticas nos Estados Unidos (poliamida 66) e na Alemanha (poliamida 6) (GILBERT, 2017; MORGAN, 1981).

Na década de 1940, a Segunda Guerra Mundial aumentou a demanda de materiais poliméricos como substitutos de borrachas naturais. Também foram dados novos usos para as poliamidas, como materiais de molde, além de seu uso como fibras. Também datam deste período o uso comercial do teflon (politetrafluoroetileno, PTFE), o desenvolvimento comercial de resinas termofixas baseadas em melamina-formaldeído, bem como os primeiros experimentos com resina epóxi. Após a guerra, a produção em larga escala de PE e PS, provocou uma grande substituição tanto de produtos fabricados a partir de outros plásticos, como de outros materiais tradicionais, como metais, madeira, vidro e couro (AFTALION, 1991; GILBERT, 2017).

Em meados da década de 1950, foram introduzidos o polietileno de alta densidade (HDPE) e o polipropileno (PP), que logo se tornariam os termoplásticos de maior produção global. O uso do polietileno tereftalato para fabricação de garrafas plásticas é introduzido em 1973. Os polímeros de cristal líquido (e.g., Kevlar) são introduzidos nos anos 1980, enquanto na década de 1990 foi produzido o primeiro plástico biodegradável, polihidroxibutirato (PHB) (GILBERT, 2017).

Os anos 2000 apresentam um aumento do uso de materiais compósitos na indústria aeroespacial, como medida de eficiência energética, através da redução de peso de aeronaves e da consequente economia de combustível. Nos anos 10, uma série de aplicações médicas tem sido desenvolvida, em especial com auxílio da tecnologia de

impressão 3D, bem como painéis flexíveis para uso em acessórios eletrônicos e células fotovoltaicas plásticas. (BPF, 2014)

2.3.1.1 Termoplásticos

Os termoplásticos, em conjunto com as fibras sintéticas, representam os materiais poliméricos mais comuns no nosso cotidiano. É difícil conceber um ambiente rotineiro no qual não estejamos cercados por produtos fabricados a partir de polímeros termoplásticos e, não obstante, a expectativa é de que o crescimento da produção deste tipo de material, que já supera a de outros materiais de produção massiva como aço e cimento, aumente cada vez mais em decorrência das perspectivas de crescimento de países de renda baixa e média (IEA, 2018).

Os principais usos finais destes produtos estão nos setores de embalagens (41%), construção civil (20%), automotivo (6%) e eletroeletrônicos (8%), sendo os 26% restantes distribuídos em diversos outros usos. Os principais termoplásticos em quantidade produzida são o polietileno (30%), utilizado principalmente para a produção de embalagens, encontrado em diferentes graus, como LDPE, LLDPE e HDPE, o polipropileno (21%), utilizado na fabricação de diversos bens como *pallets*, engradados e uma série de itens de consumo geral, cloreto de polivinila, ou PVC (15%), com grande uso na construção civil, na fabricação de perfis tubulares e acessórios, polietileno tereftalato, o PET (9%), tendo como uso de destaque as embalagens de bebidas, e o poliestireno (5%), muito utilizado em embalagens descartáveis de alimentos e como isolante térmico em construções.

Em geral, a produção de termoplásticos está localizada próxima à produção de HVCs, uma vez que é mais atrativo e menos dispendioso o comércio de longa distância dos

polímeros do que de suas matérias-primas. Desta forma, os principais produtores globais são a China com 25% da produção conjunta de HVCs e termoplásticos, Estados Unidos (~20%) e Europa (10%). (IEA, 2023a)

Neste trabalho grande detalhamento foi dado a esta classe de produtos devido a sua presença massiva no consumo cotidiano, e a sua relevância tanto no aspecto de demanda do setor de óleo e gás como no que diz respeito a seus impactos ambientais em função da destinação final, conforme discussão na sessão 2.4.

2.3.1.2 Fibras sintéticas

As fibras sintéticas são intensamente consumidas na indústria têxtil, e dominam o mercado desde meados dos anos 90, com a intensificação da “fast-fashion”, pautada no baixo custo das fibras de poliéster (CHANGING MARKETS FOUNDATION, 2021). Hoje, as fibras sintéticas representam 64% da produção global do setor de fibras, dominado de longe pelas fibras de poliéster (54%) com os 10% restantes oriundos das poliamidas (5%), polipropilenos (~3%), acrilatos e elastanos (~2%). (OPPERSKALSKI et al., 2022)

Se considerado em conjunto com os termoplásticos, o setor têxtil se torna o terceiro maior consumidor de materiais poliméricos, atrás apenas dos setores de embalagem e construção civil, portanto, tendo uma contribuição significativa para os problemas associados a descarte final. Devido ao baixo custo das fibras sintéticas com relação às naturais e ao crescimento econômico dos países em desenvolvimento, é esperada a expansão do seu consumo. (CHANGING MARKETS FOUNDATION, 2021)

2.3.1.3 Resinas Termofixas

As resinas termofixas têm como importantes representantes as famílias das alilas, aminas (ureia e melamina), bismaleimidas, epóxis, fenóis, poliésteres termofixos, polímidas termofixas, poliuretanos e silicones. Uma das principais diferenças entre os termoplásticos e os termofixos é a existência de ligações cruzadas na estrutura molecular destes últimos. Enquanto os termoplásticos apresentam uma estrutura de ligações lineares ou ramificadas, ligações covalentes nos termofixos criam uma rede tridimensional de conexões (ligações cruzadas). Essa característica impede que, como no caso dos termoplásticos, este tipo de material seja derretido para remoldagem, por exemplo. Uma vez passado o estágio de cura destes materiais, eles se solidificam e se tornam relativamente insolúveis e infusíveis. (HARPER, 2004)

Estes polímeros são utilizados para uma grande variedade de finalidades, como adesivos, revestimentos (tintas, acabamentos, etc...), fabricação de materiais compósitos, refratários e espumas, tendo grande aplicação nos setores de eletroeletrônicos, construção e automotivo. (FORSDYKE; STARR, 2002)

2.3.1.4 Elastômeros

Estes produtos incluem materiais elásticos e borrachas. No contexto da indústria petroquímica, os elastômeros termoplásticos (TPE), tendo nos compostos baseados em estireno seus principais representantes, são de particular interesse. Além destes, borrachas sintéticas como acrilonitrila butadieno (NBR), polibutadieno (PB) e policloropreno (CR) apresentam consumos significativos. Suas principais aplicações se encontram no setor automotivo, em especial na fabricação de pneus, além de aplicações industriais e bens de uso comum (HARPER, 2004).

2.3.2 Fertilizantes nitrogenados

Fertilizantes são produtos de suma importância no sistema agrícola global, sendo responsáveis pelo fornecimento de nutrientes essenciais para o desenvolvimento de plantas, em especial nitrogênio, fósforo e potássio. De particular importância para o setor petroquímico, estão os fertilizantes nitrogenados, uma vez que sua produção é derivada da amônia, obtida em grande escala a partir do gás natural, enquanto as matérias-primas para produção de potássio e fosforados são obtidas a partir da mineração. (IEA, 2021b)

Os fertilizantes nitrogenados são globalmente responsáveis por aproximadamente 29% da fixação de nitrogênio em plantações, sendo o principal meio através do qual o homem influencia na capacidade de absorção natural dos nutrientes. Assim, o principal objetivo dos fertilizantes é a redução da lacuna entre produtividade real e a teoricamente alcançável das plantações. (IEA, 2021b)

Uma série de produtos fazem parte da cadeia de fertilizantes nitrogenados, como amônia, ureia, nitratos de amônio puro e combinados, além de fosfatos e sulfatos de amônio. As plantações que apresentam as maiores demandas de fertilizantes nitrogenados são as de trigo, milho e arroz, consumindo mais da metade da demanda total. (IEA, 2021b)

O aumento populacional previsto nas próximas décadas para os países em desenvolvimento representa o principal vetor de crescimento para estes produtos com taxas de crescimento na faixa de 1-2% ao ano, enquanto a demanda em países desenvolvidos já se encontra estabilizada (IEA, 2018). Além disso, o aumento de renda em países em desenvolvimento também pode afetar esta demanda, uma vez que o aumento de riqueza tende a aumentar a participação do consumo de derivados de animais

nas dietas da população, aumentando assim a demanda por alimento para estes animais. (SCHERER et al., 2006)

2.3.3 Aditivos e componentes de combustíveis

Os aditivos petroquímicos são uma série de substâncias utilizadas para melhoria de propriedades de outros produtos, com destaque para combustíveis e lubrificantes. Em geral suas moléculas apresentam a característica de possuírem terminações oleofílicas que permitem sua solubilidade no óleo e hidrofílicas que permitem a interação com substâncias com as quais ela deve interagir (VARTANIAN, 1991).

Alguns dos usos importantes de aditivos de combustíveis são o controle de deposição (detergentes), inibição de corrosão, surfactantes para melhoria de desempenho em baixas temperaturas, antioxidantes para prevenção da formação de gomas, desemulsificantes, melhoria de octanagem ou número de cetano, biocidas e depressores de ponto de fluidez (VARTANIAN, 1991).

Lubrificantes aplicados em motores automotivos utilizam aditivos para ação detergente, neutralização de ácidos, dispersantes, antioxidantes e antierosivos. Alguns motores industriais exigem ainda aditivos para proteção contra pressões extremas⁶, enquanto máquinas utilizadas em aplicações nucleares requerem aditivos especiais para resistência a níveis elevados de radiação. Graxas, utilizadas para lubrificação industrial, utilizam ainda espessantes (VARTANIAN, 1991).

⁶ Aditivos de proteção contra pressões extremas são utilizados em máquinas industriais e atuam nas partes lubrificadas quando ocorrem grandes cargas ou choques mecânicos na máquina. Estes aditivos podem atuar formando uma camada de sacrifício que se desfaz vagarosamente evitando erosões catastróficas resultantes do contato metal com metal, ou formando uma camada de proteção que impede o contato entre os pontos de solda das partes metálicas quando ocorrem perturbações na camada de óleo.

Aditivos utilizados para combustíveis possuem uma dosagem variável na faixa de poucos ppm até 0,35% em massa. Produtos utilizados com maiores dosagens como etanol na gasolina ou FAME no Diesel são considerados componentes de mistura (ATC, 2020). Já aditivos de lubrificantes podem ser encontrados com teores na faixa de 0,05-30% em massa do óleo base. (ATC, 2016).

Além destes dois usos, alguns aditivos petroquímicos podem ser utilizados ainda nos setores de alimentos e polímeros (KLEMCHUK, 2000)

Apesar de não possuírem fim energético, os aditivos estão fortemente associados ao uso de combustíveis fósseis, seja em aplicação direta na formulação final do produto comercial, seja para lubrificação de motores de combustão interna.

2.3.4 Solventes

Solventes são geralmente líquidos em condições ambientes que possuem a capacidade de diluir outras substâncias sem afetá-las quimicamente. Os principais usos dos solventes são como componentes no preparo de tintas, bem como seus removedores; em diversos processos da indústria química, em especial processos de extração; produção de filmes de celulose, fibras sintéticas, borrachas, plásticos e resinas; agente desengordurante e em processos de lavagem a seco.

As principais famílias de solventes de interesse na indústria petroquímica são os hidrocarbonetos cicloalifáticos, (e.g. ciclohexano); hidrocarbonetos aromáticos (e.g. tolueno, xilenos, etilbenzeno, cumeno, estireno); álcoois (e.g. metanol); éteres (e.g. MTBE). (STOYE, 2000)

2.3.5 Explosivos

O principal composto derivado da indústria petroquímica para uso na fabricação de explosivos é o nitrato de amônio. Os principais usos industriais de explosivos são em mineração, infraestrutura de transportes (e.g. túneis para rodovias, ferrovias e sistema metroviário) e demolição. (MEYERS; SHANLEY, 1990).

2.4 Impactos Ambientais

Os produtos da cadeia petroquímica apresentam uma diversidade de impactos ambientais tão ampla quanto seus usos e aplicações. De maior nota, podem ser destacadas as emissões de gases de efeito estufa, poluentes atmosféricos e geração de resíduos em corpos hídricos e em terra (IEA, 2018). Apesar de ser o maior consumidor de combustíveis fósseis dentre os setores industriais, a indústria petroquímica é a terceira maior emissora de gases de efeito estufa, ficando atrás dos setores de cimento e siderúrgico (IEA, 2018). Isto se deve ao uso de combustível como matéria-prima característico desta atividade, como abordado nos itens anteriores. Além das etapas produtivas os produtos petroquímicos podem apresentar emissões e outros impactos significativos durante seu uso e após o descarte, a depender da destinação final dos resíduos. (IEA, 2018)

2.4.1 Emissões de GEE

As emissões de GEE do setor petroquímico representam aproximadamente 10% do total de emissões diretas⁷ do setor industrial (BASHMAKOV et al., 2022). Além das emissões

⁷ Emissões diretas são resultantes de fontes controladas pelo declarante, como emissões de processo, ou de motores de combustão interna. Usualmente associadas a emissões de Escopo 1. Emissões indiretas são consequência das atividades do declarante, porém ocorrem em fontes não proprietárias, como geração de

relacionadas à geração de energia para geração de calor ou vapor, por exemplo, aproximadamente 42% do total de emissões do setor corresponde a emissões de processo (BASHMAKOV et al., 2022). A produção de químicos básicos representa 60% das emissões totais do setor, tendo como principal contribuinte a produção de amônia, com 49% deste montante, seguida dos HVCs e metanol, que contribuem com 27% e 24%, respectivamente. (IEA, 2018) É importante ressaltar que muitas plantas da cadeia de produção petroquímica possuem suas próprias fontes de geração de energia e, portanto, não teriam suas emissões de escopo 2⁸ diretamente afetadas por alterações das matrizes energéticas das regiões em que estão instaladas. (HAMILTON et al., 2019)

Vale destacar que a intensidade das emissões de CO₂ por tonelada de produto é dependente da rota adotada, assim, as produções de amônia e metanol a partir o carvão chegam a ser 2,5 e 5 vezes mais intensas, respectivamente, que as rotas baseadas em gás natural (IEA, 2018). Por outro lado, como o metano possui um potencial de aquecimento global (GWP) de 27 a 30 vezes maior que o CO₂, as emissões fugitivas deste gás nas rotas baseadas em gás natural também não devem ser desprezadas. (BAUER et al., 2022c).

A aplicação de fertilizantes sintéticos no setor agrícola representa a maior fonte de emissão dos produtos petroquímicos na etapa de uso. As reações decorrentes do seu uso na nutrição de plantações liberam óxido nitroso (N₂O) na atmosfera, um gás de efeito estufa com GWP 265 vezes superior ao CO₂ (IEA, 2018). A ureia, em especial, libera o CO₂ utilizado em sua produção, além de N₂O. Além dos fertilizantes, outros produtos, como solventes, aditivos e explosivos também podem liberar gases de efeito estufa

energia elétrica consumida da rede (Escopo 2) ou emissões associadas ao ciclo das matérias-primas e produtos (Escopo 3)

⁸ Emissões de Escopo 2 correspondem aos GEEs emitidos no processo de geração da energia elétrica consumida pela unidade produtiva a partir da rede. Apesar de as emissões ocorrerem fisicamente na planta de geração, são contabilizadas no inventário de GEE da organização por derivarem de sua demanda energética.

durante sua utilização, porém estas quantidades são pouco documentadas e ocorrem em uma escala inferior à das emissões do setor agrícola. (IEA, 2018)

Em especial no caso dos materiais plásticos, uma parte importante das emissões de GEE ocorre após o uso, a depender da forma como é realizado o descarte. A incineração dos resíduos, em média, é o tipo de destinação que acarreta a maior intensidade de carbono (2,3 tCO₂eq/tonelada de plásticos, sem recuperação energética), seguida do aterramento e da reciclagem, quando considerados os deslocamentos de matéria-prima virgem (HAMILTON et al., 2019; OECD, 2022). Os plásticos possuem um alto poder calorífico e, em algumas regiões, o seu uso em unidades de *Waste-to-Energy* é valorizado, intensificando as emissões de ciclo de vida destes produtos (BAUER et al., 2022a). Além disso, estudos apontam que o lixo plástico despejado de maneira inadequada em terra ou corpos hídricos emite gases de efeito estufa, como metano e etileno, conforme se degrada e que a presença de microplásticos nos oceanos impactam sua capacidade de absorção de CO₂ (HAMILTON et al., 2019; ROYER et al., 2018).

2.4.2 Poluição Atmosférica

Além da emissão de gases de efeito estufa, o setor petroquímico emite gases poluentes, sendo o segundo maior emissor industrial de SO₂ e NO_x, atrás apenas do setor de ferro e aço (IEA, 2018). Também é responsável por 20% das emissões industriais de PM_{2,5} (IEA, 2018). O fato de estas indústrias tipicamente estarem localizadas afastadas de centros urbanos e se tratarem de emissores estacionários (ao contrário de veículos, por exemplo) ameniza os impactos na população e facilita a implementação de medidas mitigadoras, como uso de filtros e equipamentos de otimização de combustão. Assim como no caso de emissão de gases de efeito estufa, a produção baseada em carvão, neste caso a partir de

sua queima para fins energéticos, aumenta a intensidade de emissões de SO₂ e PM_{2,5}. (IEA, 2018)

Durante a etapa de uso, produtos como adesivos, solventes, tintas e pesticidas são importantes emissores de compostos orgânicos voláteis (VOC), atualmente rivalizando com emissões veiculares como principais fontes de poluição atmosférica em áreas urbanas (IEA, 2018). Os efeitos desta poluição são mais perceptíveis em temperaturas mais elevadas quando ocorre a formação de *smog* e pode causar danos a vida vegetal e ao trato respiratório humano e de outras espécies animais (STOYE et al., 2006). O desgaste de pneus e pastilhas de freios também são importantes fontes de poluição do ar por microplásticos e particulados, que também podem contribuir para problemas respiratórios (OECD, 2022).

2.4.3 Resíduos e Descarte

Em termos de descarte e gerenciamento de resíduos, os materiais plásticos se destacam frente aos demais produtos da cadeia devido ao fato de sua decomposição natural ocorrer em uma escala de tempo que pode variar entre 3-250 anos para sacolas plásticas de LDPE e garrafas de leite de HDPE até milhares de anos, como no caso de tubulações de HDPE, que possuem uma meia-vida estimada de 1200 anos (OECD, 2022). O crescimento esperado no uso destes materiais invariavelmente acarretará o aumento de geração de resíduos.

A magnitude do problema dos resíduos plásticos foi reconhecida globalmente e em 2022 foi formado um comitê intergovernamental de negociações (INC) dentro do programa de meio ambiente das nações unidas (UNEP) para criação de um instrumento legal para lidar com a crise de resíduos plásticos incluindo todas as etapas de seu ciclo de vida, da

produção ao descarte (UNEP, 2022, 2023). Um estudo recente aponta que a humanidade está operando além das capacidades de suporte planetárias no que diz respeito a geração de novas entidades⁹ e identifica a poluição plástica como uma das principais preocupações neste aspecto, atingindo uma escala em que é capaz de interferir nos ciclos biogeoquímicos do planeta (PERSSON et al., 2022). Exemplos destes impactos podem ser vistos com a formação dos vórtices de lixo no Pacífico (IEA, 2018), que inclusive já são capazes de sustentar a vida de espécies costeiras que alcançaram estas regiões através de flutuação em resíduos (HARAM et al., 2023). Outros exemplos são os análogos rochosos formados a partir de resíduos plásticos em regiões costeiras (SANTOS et al., 2022) e a interferência da poluição plástica nas cadeias de corais (PINHEIRO et al., 2023).

As três principais formas de lidar com os resíduos plásticos são a reciclagem, incineração e aterramento. A destinação mais desejada para os resíduos seria a reciclagem, que contribui para a redução da demanda de matéria-prima de origem fóssil e apresenta baixa intensidade de emissões de GEE, porém as dificuldades técnicas e logísticas presentes nas rotas de reciclagem atuais, associadas aos baixos custos das demais alternativas, favorecem estas últimas. Tanto a incineração quanto o aterramento são fontes potenciais de poluição atmosférica, de corpos hídricos e de emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2018), tratados nos demais tópicos desta seção. A maioria dos estudos indica que os impactos ambientais gerais da incineração com recuperação energética são menores que

⁹ Novas entidades são definidas como novas substâncias, novas formas de substâncias conhecidas e formas de vida modificadas, incluindo produtos químicos e outros tipos de materiais engenheirados ou organismos anteriormente não conhecidos no sistema terrestre, bem como elementos de ocorrência natural (e.g. metais pesados) mobilizados por atividades antropogênicas. (PERSSON et al., 2022)

os do aterramento, porém maiores que os da reciclagem (WILLIAMS; GOWER; GREEN, 2019).

A incineração pode ser realizada com ou sem recuperação energética. Em países desenvolvidos boa parte das unidades de incineração aproveita a energia térmica obtida na queima, o que requer mais investimento nas unidades. Independente da presença de aparato para recuperação energética, a prevenção da poluição atmosférica só é possível através do uso de equipamentos que promovam a queima limpa, como lavadores de gás exausto ou queimadores de baixo-NO_x. Já o aterramento, especialmente quando mal gerenciado pode resultar em fonte de poluição para corpos hídricos e representar riscos de saúde para as comunidades vizinhas (IEA, 2018).

Aproximadamente 22% do total de resíduos plásticos gerados globalmente não recebe tratamento adequado, podendo ser descartados em lixões sem tratamento adequado (43% deste montante), queimados de forma não controlada em regiões sem coleta seletiva ou em aterros para redução do volume de lixo (33%) e o restante perdido para o ambiente marinho ou terrestre (OECD, 2022).

Uma das principais preocupações atuais quanto aos resíduos plásticos é a formação de microplásticos. Enquanto macroplásticos são os resíduos sólidos perceptíveis, microplásticos são partículas de polímero com diâmetros inferiores a 5 mm. Os microplásticos podem ocorrer de algumas formas, sendo projetados com estas dimensões (microplásticos primários) como em alguns produtos cosméticos e biomédicos, ou resultantes do desgaste de produtos plásticos (abrasão de pneus, liberação de microfibras na lavagem de tecidos sintéticos) ou da degradação de resíduos macroplásticos (microplásticos secundários) (OECD, 2022). A proliferação e o alcance deste tipo de resíduo tem sido tema de diversos estudos, e a sua presença já foi detectada nos ambientes

mais remotos do planeta como nas camadas de gelo dos polos norte e sul (MATERIĆ et al., 2022), nas fossas das marianas (PENG et al., 2018), em nuvens formadas entre 1300 e 3776 metros em montanhas do Japão (WANG et al., 2023) e a 8440 metros de altura, no monte Everest (NAPPER et al., 2020), bem como em diversos tecidos do organismo humano, inclusive em amostras de sangue e leite materno (COX et al., 2019; JENNER et al., 2022; LESLIE et al., 2022; RAGUSA et al., 2022).

Para além dos materiais plásticos, o descarte inadequado de solventes pode representar perigos de saúde, além dos demais impactos discutidos ao longo desta seção, e são combustíveis. Além da absorção por vias respiratórias, solventes também podem ser absorvidos através da pele, e o dano causado vai depender de cada material, da concentração e dos tempos de exposição (THOMÉ-KOZMIENSKY et al., 2008).

2.4.4 Poluição de Corpos Hídricos

Os produtos químicos podem alcançar os corpos hídricos a partir de lixiviação no setor agrícola, despejo de resíduos aquosos domésticos e comerciais e vazamentos de aterros. Um exemplo importante deste tipo de contaminação é a eutrofização que pode ser ocasionada pela lixiviação de fertilizantes ou despejo de detergentes, acarretando um aumento repentino de algas, que consomem o oxigênio de determinada região levando a morte de outros seres que habitam o lago, rio ou outro corpo hídrico contaminado. (IEA, 2018)

Estima-se que mais de 90% do resíduo plástico que alcança os oceanos tem origem terrestre (OECD, 2022). Uma fonte importante de poluição de corpos hídricos é a lavagem de roupas de material sintético. Aproximadamente meia tonelada de microplásticos são despejadas anualmente no oceano em decorrência da lavagem de materiais feitos de

tecidos como poliéster, náilon e acrílicos. (CHANGING MARKETS FOUNDATION, 2021)

A ingestão de plásticos por espécies marinhas pode levar a engasgamento, perfuração de órgãos internos e até mesmo inanição devido a “pseudo-saciação” (OECD, 2022). Um efeito menos perceptível da poluição plástica nos oceanos é a liberação de produtos tóxicos presentes como aditivos em sua composição. Além disso, microplásticos podem atrair e concentrar outros poluentes como pesticidas e solventes. A ingestão destes produtos em conjunto com os microplásticos gera um processo de bioacumulação ao longo da cadeia alimentar, podendo alcançar até mesmo a espécie humana, especialmente em comunidades que dependem da pesca como principal fonte de proteínas (WILLIAMS; GOWER; GREEN, 2019).

2.5 Alternativas ao uso dos fósseis

De modo geral, existem duas grandes estratégias possíveis, quando se avaliam soluções para a redução de uso de matéria-prima fóssil virgem para fins não-energéticos. Pelo lado da oferta, existem as possibilidades de deslocamento da demanda de material fóssil a partir de sua substituição por matérias-primas alternativas ou pela reciclagem. Pelo lado da demanda, podem ser adotadas práticas que afetam diretamente a intensidade de consumo material nos setores de uso final. O mais esperado é que o conjunto de ações dentro do setor petroquímico que possibilitem o cumprimento da meta de redução de temperatura do Acordo de Paris abarque uma combinação destas estratégias (ZHENG; SUH, 2019). Todas essas abordagens possuem vantagens e desafios que são abordados nos itens que se seguem.

2.5.1 Matérias-Primas Alternativas

Além das rotas tradicionais de produção a partir de matéria-prima fóssil, os produtos químicos básicos podem ser derivados de biomassa ou sintetizados a partir de CO₂ capturado e H₂ de baixa emissão de GEE.

2.5.1.1 Biomateriais

Os primeiros produtos químicos e plásticos fabricados pelo homem foram biopolímeros. Os polímeros sintéticos começaram a substituir gradativamente estes produtos a partir da década de 1930 (IEA; OCDE, 2009). Atualmente, a capacidade total de produção de plásticos derivados de biomateriais representa menos de 1% da capacidade total da produção de plásticos global e a associação de produtores de bioplástico da Europa estima um crescimento dessa capacidade de produção em cerca de 23% ao ano para o período de 2021-2027 (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2022). Por outro lado, projeções da OCDE estimam um crescimento na demanda deste tipo de material de apenas 2,6% para o mesmo período em um cenário *business-as-usual* (OECD, 2023a). Além disso, a produção dos principais polímeros avaliados neste trabalho (ver seção 3.1.1) representa menos da metade dos plásticos produzidos a partir de biomassa, cuja produção é dedicada em grande parte ao ácido polilático (PLA) e polihidroxicanoatos (PHAs) (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2022; SCOTT et al., 2020).

As principais rotas para produção dos químicos básicos a partir de biomassa são:

- Metanol: gaseificação da biomassa em processo análogo à rota baseada em carvão (BAZZANELLA; AUSFELDER; DECHEMA, 2017), ou via biometano derivado de biodigestão (BAENA-MORENO et al., 2020);

- Etileno: Desidratação do etanol ou a partir de bioMetanol pelo processo de *Metanol-to-Olefins* (MTO);
- Propileno: Metátese com bioEtileno e 2-buteno produzido a partir da dimerização seguida de isomerização do próprio bioEtileno; MTO ou *Metanol-to-Propylene* (MTP);
- BTX: A rota mais desenvolvida para produção de aromáticos seria a *Metanol-to-Aromatics* (MTA), similar a MTO/MTP, porém ainda com menor grau de maturidade tecnológica.

Diversas rotas alternativas existem com baixos níveis de maturidade tecnológica, como produção fermentativa de propanol ou isopropanol seguida de desidrogenação a propileno, produção fermentativa direta de propileno, conversão catalítica de etanol a propileno. p-Xileno pode ser produzido a partir de bioetanol. Aromáticos também podem ser obtidos a partir de degradação da lignina e pirólise de biomassa lignocelulósica (BAZZANELLA; AUSFELDER; DECHEMA, 2017).

Vale ressaltar que a amônia não possui átomos de carbono em sua molécula. Apesar de ser derivado do gás natural, apenas o hidrogênio gerado no gás de síntese é aproveitado na sua produção. Desta forma, fontes alternativas de carbono não são essenciais para a produção deste químico básico, sendo necessária apenas uma fonte alternativa de hidrogênio (ver item 2.5.1.2). Fertilizantes orgânicos podem ser obtidos a partir de turfa, resíduos animais, vegetais e até mesmo de resíduo municipal (SCHERER et al., 2006). Porém, a adoção destas alternativas, associadas a práticas complementares de agricultura orgânica, levam a outros desafios para o estabelecimento de uma agricultura sustentável, uma vez que existem déficits tanto no rendimento por área de plantio quanto no teor de nitrogênio suprido às plantações, resultando em maiores demandas de área para suprir

uma mesma demanda energética. A substituição de fertilizantes nitrogenados por práticas de agricultura orgânica se mostra sustentável apenas quando complementadas com mudanças no perfil de demanda de alimentos, como redução no consumo de derivados animais e uma redução do desperdício e tratamento dos resíduos agrícolas (BRANTES ANGELKORTE, 2023; MULLER et al., 2017).

Atualmente, as três principais famílias de biopolímeros comercialmente disponíveis são os ácidos poliláticos (PLA), polihidroxibutiratos (PHB, que fazem parte da família dos PHA) e os plásticos baseados em bioetileno (bio-PE, bio-PET, etc...). O uso dos derivados de bioetileno acarretam uma substituição direta dos plásticos de origem fóssil uma vez que o produto final é idêntico, podendo ser designados como plásticos drop-in. Já o uso dos PHAs e PLA representam uma substituição funcional dos plásticos fósseis, podendo ser usados como bons substitutos de PE, PP, PS (PHAs) e PS e PET (PLA). Para algumas aplicações específicas, ambos podem substituir também o PVC (DANIEL POSEN et al., 2017).

Muito esforço tem sido dispendido para o desenvolvimento de novos polímeros utilizando monômeros derivados de terpenos, como o limoneno (que pode ser combinado com CO₂ capturado na produção de policarbonatos), triglicerídeos obtidos a partir de óleos vegetais e outros usos para carboidratos. O maior desafio para estas alternativas ainda é a obtenção de rotas eficientes, que permitam a obtenção dos produtos em escala, com elevada conversão e a um preço competitivo com seus substitutos fósseis (HILLMYER, 2017; ZHU; ROMAIN; WILLIAMS, 2016). Outra frente de pesquisa consiste na adaptação de polímeros de ocorrência natural como polissacarídeos (celulose, ágar, quitosano, pululano) e lignina, em especial para a produção de filmes plásticos. O uso destes polímeros naturais requer muitas vezes a adequação de suas propriedades para as

aplicações através de aditivos (SILVA et al., 2022; WANG; GANEWATTA; TANG, 2020).

Uma oportunidade a ser considerada é a sinergia entre a produção de combustíveis alternativos para os setores de difícil abatimento como aviação e transporte marítimo. Devido à dificuldade de eletrificação destes setores, a grande aposta de longo prazo para ambos é o uso de combustíveis líquidos alternativos. Algumas rotas de produção destes combustíveis, como rotas de Fisher-Tropsch para ambos os casos, HVO para bunker marítimo e Biomass-to-Liquids para SAF, podem coproduzir bionafta, que pode ser direcionada para craqueadores a vapor, e bioGLP, do qual pode ser obtido propeno (MÜLLER-CASSERES et al., 2022). Outras rotas para obtenção de bioGLP são a desidrogenação de óleos vegetais ou glicerina, ainda em fase de demonstração e piloto, respectivamente, e fermentação de açúcares, ainda em fase de demonstração (JOHNSON, 2019).

É importante destacar a diferença entre bioplásticos e plásticos biodegradáveis. Alguns bioplásticos, como o polietileno derivado do etanol, são produzidos através de fontes de matéria-prima e processos alternativos, porém resultam exatamente nas mesmas moléculas geradas pelas rotas tradicionais derivadas de materiais fósseis, contendo as mesmas características e propriedades. Sendo assim, esses plásticos não são biodegradáveis e, portanto, apesar de contribuírem para a descarbonização do setor petroquímico, não interferem nos impactos gerados pelos seus resíduos. De forma análoga, existe a possibilidade de produção de plásticos biodegradáveis tanto a partir de fontes fósseis (e.g. polibutileno adipato tereftalato, PBAT) como de biomassa (e.g. PLA) (IEA, 2018). Ainda deve se destacar que as condições de biodegradação também podem ser variáveis, com materiais que se degradam com maior facilidade em condições

ambientes enquanto outros que necessitam de condições mais severas de compostagem (RAI et al., 2021).

Além de reduzir a dependência de fontes fósseis, em geral a produção de plásticos a partir da biomassa gera menos emissões de gases de efeito estufa do que as rotas tradicionais (ZHENG; SUH, 2019), porém estudos mais aprofundados são necessários para verificação da redução das emissões de GEE ao longo de todo o ciclo de vida. Em especial, a aplicação de bioplásticos (bioHDPE, bio-PET e bioEPS) no setor de construção possui o potencial de geração de emissões negativas de GEE pela combinação da matéria-prima utilizada e do uso final de longa duração, a depender do tipo de disposição do resíduo ao fim da vida útil (DE OLIVEIRA et al., 2021a).

A substituição da matéria-prima fóssil se torna mais urgente quando considerados os demais produtos da cadeia petroquímica, como borrachas, resinas termofixas, fibras sintéticas, adesivos, corantes, detergentes, tintas e revestimentos. Muitos destes produtos apresentam grandes dificuldades de gerenciamento de coleta para reciclagem de resíduos, resultando num uso constante de novo material fóssil para atendimento de suas demandas de produção (MATERIAL ECONOMICS, 2021).

Um dos principais problemas relativos ao uso da biomassa é a gestão do trilema energia-alimento-material, ou seja, como lidar com a competição destes três setores pelo uso da biomassa (DE OLIVEIRA et al., 2021a). Para assegurar o uso sustentável da biomassa, devem ser ainda considerados possíveis impactos como erosão do solo, escassez hídrica, uso de pesticidas, eutrofização devido ao excesso de fertilizantes, disponibilidade e mudanças de uso do solo, impactos na biodiversidade, entre diversos outros. Além disso, o uso de biomassa como matéria-prima também acarreta algumas limitações de distância

entre a área de plantio para a unidade de produção por questões de logística e emissões associadas ao transporte (BAZZANELLA; AUSFELDER; DECHEMA, 2017).

2.5.1.2 e-Materiais

Uma alternativa para redução da dependência da indústria química de fontes fósseis é a produção de hidrocarbonetos sintéticos. Quando associados as tendências de eletrificação com fontes renováveis, estes produtos são também chamados de e-materiais. A indústria petroquímica é baseada em processos de transformação baseados essencialmente no carbono e hidrogênio. As reações de gás de síntese são conhecidas há décadas na indústria e podem ser usadas para a produção dos químicos básicos a partir de hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Ao invés das rotas tradicionais baseadas em fontes fósseis, rotas alternativas podem ser buscadas através de tecnologias com baixo potencial emissivo de GEE (BAZZANELLA; AUSFELDER; DECHEMA, 2017).

A produção de químicos básicos, finos e polímeros pode ser baseada em tecnologias de captura e utilização de carbono (CCU), removendo CO₂ de fontes pontuais na indústria, como gases exaustos e CO₂ gerado nos processos de produção de cimento e aço (BAZZANELLA; AUSFELDER; DECHEMA, 2017), ou através da captura direta da atmosfera (DAC). O CO₂ obtido desta forma é utilizado como fonte alternativa de carbono na produção petroquímica.

Além do carbono, existe a necessidade de suprimento de uma fonte alternativa de H₂. A tecnologia mais desenvolvida para obtenção deste hidrogênio é a eletrólise da água associada a fontes de energia renováveis (IEA, 2023b). Outras possíveis rotas para produção do hidrogênio são as seguintes:

- Gaseificação de biomassa (IEA, 2023b);

- Decomposição térmica direta do biometano, ou assistida por plasma ou catálise (IEA, 2023b);
- Termólise direta da água a partir de energia solar ou nuclear (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2023 [acessado]);
- Fotólise da água utilizando células eletroquímicas ou microrganismos (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2023 [acessado]);
- Decomposição microbiológica de matéria orgânica com ou sem ativação solar (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2023 [acessado]);
- Reforma do etanol (HOU et al., 2015; NI; LEUNG; LEUNG, 2007);
- Extração de hidrogênio de formações naturais (IEA, 2023b).

As principais rotas para obtenção dos químicos básicos são muito similares às rotas citadas na produção a partir da biomassa, sendo a principal diferença, a fonte de carbono:

- Amônia: Como citado no item anterior, a amônia não depende de carbono, portanto sua produção vem diretamente do aproveitamento do H₂ de baixas emissões com o nitrogênio;
- Metanol: O metanol é produzido a partir da hidrogenação do CO₂ capturado com o hidrogênio de fontes renováveis. Este processo gera água como subproduto que deve ser separada do metanol, etapa que não é necessária nas rotas tradicionais e de biomassa;
- HVCs: Os processos de sintetização de olefinas e aromáticos são os já mencionados MTO/MTP/MTA, utilizando o e-metanol.

Por se tratar de uma reação altamente endotérmica, a hidrólise da água para obtenção de H₂ se torna uma das principais consumidoras de energia em todas as rotas descritas (BAZZANELLA; AUSFELDER; DECHEMA, 2017).

Uma forma alternativa de obtenção de e-materiais seria a produção de nafta sintética a partir da reação de Fischer-Tropsch com hidrogênio de fontes renováveis e produzir os HVCs em craqueadores a vapor, preferencialmente eletrificados (SAYGIN; GIELEN, 2021).

Em termos de impactos em emissão de GEEs, estas tecnologias reduzem as emissões de CO₂ diretamente através de sua captura nas fontes ou remoção do ar, além de evitar as emissões da cadeia produtiva (*cradle-to-gate*) associadas as rotas tradicionais. Por outro lado, os processos envolvidos nas rotas de produção alternativas não são isentos de emissões, portanto haverá um saldo de GEE que precisa ser avaliado. Finalmente, os produtos obtidos a partir destas rotas são os mesmos gerados a partir de fontes fósseis, portanto, as emissões e demais impactos associados as fases de uso e destinação final (*gate-to-grave*) permanecem inalterados (KÄTELHÖN et al., 2019).

Um desafio para a implementação destas rotas alternativas decorre da seleção das fontes de CO₂. As fontes industriais apresentam altas concentrações deste gás em sua exaustão, o que favorece termodinamicamente as reações de captura, resultando em uma demanda menor de energia para este processo. Entretanto, considerando a tendência de descarbonização da indústria, é possível que estas fontes se tornem cada vez mais escassas ao longo do tempo. Desta forma, as alternativas seriam o uso de DAC e de biocombustíveis como fonte energética nas indústrias. Tais alternativas permitiriam, em teoria, o fechamento do ciclo do carbono mesmo com a eventual incineração dos produtos finais (KÄTELHÖN et al., 2019). Vale ressaltar que a tecnologia de DAC ainda apresenta

potenciais barreiras de ordem técnico-econômica para sua implementação. O nível de diluição do CO₂ atmosférico implica em grandes custos energéticos para sua captura, custos estes intensificados devido à estabilidade química deste composto, necessitando de significativas entradas de calor ou variações de pressão e umidade no seu ciclo de regeneração. Somado a isso, se encontram os altos custos associados as atividades de compressão, transporte e injeção do gás capturado (MAIA, 2021). Em contrapartida, as correntes concentradas oriundas da queima de biomassa não apresentam estas restrições. NASCIMENTO DA SILVA; ROCHEDO; SZKLO, 2022 apresentam um estudo do aproveitamento do CO₂ originário de uma unidade de FCC operando em modo de oxidação em uma refinaria, no qual o oxigênio utilizado é oriundo do processo de eletrólise para geração de hidrogênio, demonstrando as potenciais sinergias do aproveitamento de correntes com o uso de tecnologias inovadoras na indústria.

2.5.2 Reciclagem

Devido à natureza da indústria petroquímica, seus diversos produtos – com a notável exceção de parte da cadeia da amônia – possuem grande teor de carbono em sua composição, que pode ser liberado na forma de CO₂ ao fim de sua vida útil, dependendo de sua natureza e destinação final. A reciclagem, em especial no que diz respeito aos plásticos, é uma forma de manter este carbono circulando por mais tempo na economia e ao mesmo tempo deslocar parte da demanda de fontes fósseis virgens.

Além do deslocamento de fontes fósseis virgens, a reciclagem age diretamente sobre os impactos de uso final dos produtos petroquímicos, um ponto de especial preocupação no caso dos resíduos plásticos (KAMINSKY, 2000).

Enquanto outros materiais de uso massivo, como aço e alumínio apresentam altas taxas de coleta para reciclagem, na ordem de 85% e 70%, respectivamente, o plástico não atinge 20% (IEA, 2023a). O aumento desta taxa passa por políticas de incentivo ao aumento da separação e coleta, bem como inovação em tecnologias para aumentar o rol de plásticos adequados para reciclagem. Ao contrário dos metais mencionados, uma dificuldade de planejamento de políticas de reciclagem é a falta de um setor alvo bem definido, como veículos ou construção civil, uma vez que os plásticos permeiam quase todos os setores de consumo (IEA, 2023a). A baixa taxa de reciclagem dos plásticos se dá também em grande parte devido as dificuldades do processo de reciclagem mecânica, que incluem etapas de limpeza, derretimento e reprocessamento dos plásticos. Além disso, presença de correntes misturadas de resíduos contendo diversos tipos de plásticos, o uso de diversos aditivos como corantes, estabilizadores e retardantes de chama, além da própria contaminação com produtos, no caso de plásticos usados em embalagens, dificultam a obtenção de material que permita o reaproveitamento de material com a qualidade original (MATERIAL ECONOMICS, 2018a). O mais comum é a reciclagem com perda de qualidade, o chamado “down-cycling”, fazendo com que os materiais não possam ser aproveitados por mais do que dois ciclos de reciclagem (IEA, 2018), limitando a capacidade de deslocamento de material virgem. Esta perda de qualidade ainda incorre em uma perda de valor de mercado destes produtos secundários, o que dificulta o investimento nesta cadeia de produção.

Neste aspecto, merece destaque o caso das garrafas PET. Este polímero em especial apresenta um valor de mercado da resina reciclada para grau alimentar compatível com o da resina virgem, por se tratar de um dos poucos polímeros em que uma circularidade completa (garrafa-garrafa) pode ser alcançada. Entretanto, a maior parte da reciclagem de

garrafas PET é destinada para a produção de fibras sintéticas (MATERIAL ECONOMICS, 2020) acarretando uma quebra dessa circularidade e direcionando este material para aterros sanitários ou incineração, destinações mais comuns para resíduos têxteis ao final de sua vida útil (CHANGING MARKETS FOUNDATION, 2021).

Entretanto, a transição para uma economia circular¹⁰ requer não só uma grande expansão da reciclagem mecânica como também o desenvolvimento em escala comercial da reciclagem química (ROBAINA et al., 2020). A reciclagem química seria capaz de decompor os plásticos a seus respectivos monômeros ou reduzir uma mistura de resíduos em um óleo que pode ser aproveitado para reconversão (MATERIAL ECONOMICS, 2018a). Entre os possíveis processos de reciclagem química, podem ser listados (BELL; TAKADA, 2021):

- **Despolimerização química:** processo de inversão da polimerização, que produz monômeros ou fragmentos chamados oligômeros. Processo altamente seletivo, funcional apenas para polímeros puros, bem desenvolvido para PET e PTA (ácido tereftálico purificado), mas também aplicável para PA (poliamida), PU (poliuretano), PLA, PHA, PEF (polietileno furanoato), PC (policarbonato) e alguns poliésteres. Os produtos obtidos são de alta pureza e isentos de contaminação por aditivos. Atualmente esta tecnologia se encontra disponível apenas em escala de planta piloto industrial;
- **Regeneração por solventes:** O processo de regeneração por solventes possibilita a recuperação do polímero em estado próximo ao virgem, removendo a maior parte dos aditivos presentes no produto sem afetar a estrutura do polímero;

¹⁰ Modelos de economia circular preconizam a manutenção do valor adicionado de produtos pelo maior período possível, reduzindo a geração de resíduos, preservando os recursos por mais tempo dentro da economia através de estratégias de redução de consumo, reuso e reciclagem (ROBAINA et al., 2020)

- **Despolimerização térmica:** Este termo é utilizado para se referir aos processos de pirólise e gaseificação de resíduos plásticos. Ao contrário dos processos anteriores o produto é uma mistura de hidrocarbonetos e contaminantes que deve passar por um novo refino para obtenção das matérias-primas desejadas, que serão então reprocessadas;
- **Despolimerização usando oxidação com água supercrítica (SCWO):** O processo de SCWO foi desenvolvido para decomposição de poluentes orgânicos persistentes (POP's), porém, plásticos produzidos via polimerização por condensação (e.g. PET, PA), podem ser decompostos por esse processo e ter seus monômeros recuperados com alta pureza. O processo consiste na decomposição de compostos orgânicos usando agentes oxidantes como peróxido de hidrogênio, oxigênio ou nitritos em meio de água supercrítica. Processos similares utilizando água subcrítica e metanol também foram desenvolvidos;
- **Despolimerização bacteriana:** Ainda em estágio experimental, esta técnica consiste no uso de uma enzima bacteriana potencializada artificialmente de forma a aumentar a eficiência de sua degradação natural de PET em monômeros;
- **Hidrocraqueamento de resíduos plásticos:** Como o nome indica, se trata do processo de hidrocraqueamento de resíduos plásticos, isto é, a quebra de ligações carbono-carbono com o uso de hidrogênio a alta pressão. Este processo tem vantagem sobre a pirólise por produzir menos aromáticos e insaturados, sendo mais estável para uso em craqueadores a vapor (DA SILVA, 2023).

Um problema potencial da reciclagem dos plásticos é a presença dos POP's em muitos produtos. POP's são poluentes químicos tóxicos que possuem seus níveis de concentração permitidos definidos pela Convenção de Estocolmo. Diversos produtos cotidianos como

eletrônicos, veículos e fibras sintéticas utilizadas em mobílias e carpetes utilizam estes componentes e de acordo com as regras da convenção, quando presentes em níveis acima dos limites, os resíduos destes produtos devem ser destruídos, e nunca reciclados. Entretanto, a precariedade dos sistemas de coleta e separação em muitas regiões pode dificultar a filtragem destes itens, que acabam sendo reprocessados, como já reportado em alguns casos (GREENPEACE, 2023). Entre os impactos dos POP's, além de seus efeitos tóxicos, estão a sua persistência no meio ambiente e contaminação da cadeia alimentar por bioacumulação (BELL; TAKADA, 2021).

Para além dos termoplásticos, as resinas termofixas e solventes possuem tecnologias de reciclagem (SCHÖNTHALER; SCHÖNTHALER, 2000; STOYE, 2000). Para borrachas sintéticas e, em especial, pneus, a principal forma de aproveitamento dos resíduos é a incineração no forno para produção de cimento (THREADINGHAM et al., 2004).

2.5.3 Soluções de Redução de Demanda

As principais ferramentas em vigor que agem sobre a demanda de materiais petroquímicos são as restrições ao uso de certos tipos de plástico, em especial os descartáveis. Entretanto, para que as perspectivas de crescimento de demanda de plásticos sejam adequadamente tratadas, medidas mais transversais que incluam padrões de consumo em setores como construção, automotivo, eletrônicos e têxteis, entre outros, devem ser implementadas (BAUER et al., 2022c).

O conceito de eficiência material, de forma análoga a sua contraparte energética, se baseia na possibilidade de prover a mesma intensidade de serviços materiais com uma menor intensidade de consumo de matérias-primas. De forma geral, adotando uma perspectiva histórica, antes da revolução industrial, medidas de eficiência material eram mais comuns

como formas de manutenção e recuperação de produtos, uma vez que os custos de produção favoreciam a extensão da vida útil de bens materiais (ALLWOOD et al., 2011). A produção industrial deu início a um processo de intensificação do consumo, e o desenvolvimento da indústria petroquímica, em especial a partir da segunda metade do século XX, a um grande crescimento do uso de produtos plásticos descartáveis utilizados no cotidiano. Por um período, a abundância de matéria-prima barata e o incentivo ao crescimento econômico baseado no consumo, levou a uma redução na vida útil média de produtos, uma vez que estes poderiam ser facilmente substituídos. Apesar da crescente preocupação com a descarbonização da economia, poucos estudos abordam estratégias de redução da demanda no setor petroquímico.

Entre as ações que possibilitam a redução da demanda, a extensão da vida útil de produtos finais é uma estratégia possível. O principal compromisso (*trade-off*) a ser pensado para essa abordagem está entre os impactos ambientais das fases de produção e de uso. A extensão é mais interessante em produtos com grandes impactos na fase de produção e impactos menos significativos nas fases de uso (ALLWOOD et al., 2011). No que concerne os impactos relativos aos plásticos, as principais emissões se encontram nas fases de produção e destinação final, portanto, em primeira análise, a extensão de vida útil pode parecer uma boa opção. Entretanto, atenção deve ser dada aos impactos da fase de uso dos produtos de forma geral, uma vez que plásticos são utilizados nos mais variados setores, inclusive na fabricação de automóveis e aparelhos de ar-condicionado, por exemplo, que podem apresentar emissões significativas nesta etapa. Nestes casos, a substituição por modelos mais modernos com menores impactos na fase de uso pode se mostrar uma alternativa mais interessante.

Outro aspecto a ser considerado são os comportamentos tanto dos produtores, quanto dos consumidores. Por um lado, os produtores têm interesse em fluxos de venda maiores e a extensão de vida útil vai diretamente contra este objetivo, reduzindo a frequência de reposição dos bens. Por outro lado, muitos produtos do cotidiano são substituídos não por questões de obsolescência ou perda de finalidade, mas por preferências ligadas a status ou identidade cultural dos consumidores, o que, em alguns casos resulta no descarte de produtos antes de sua expiração. A questão da identificação e do “valor emocional” dado a alguns produtos pode ser utilizada de forma positiva ao se tentar conscientizar os consumidores sobre o uso sustentável dos produtos e também através de iniciativas de economia de compartilhamento e substituição de consumo de produtos por serviços. (ALLWOOD et al., 2011) Provedores de serviços tenderiam a ter maior interesse na manutenção e extensão da vida útil de seus ativos, que ao mesmo tempo teriam maior intensidade de uso ao longo de sua vida útil, reduzindo a demanda por novos bens e, conseqüentemente mais material. (SCOTT et al., 2020)

A vida útil dos produtos também pode ser estendida através do seu reaproveitamento, seja por vias de vendas diretas, nos casos em que existe demanda, como automóveis e eletrodomésticos, seja através do aproveitamento de peças para remanufatura (ALLWOOD et al., 2011). Ganhos consideráveis poderiam ser obtidos com este tipo de estratégia caso o produto já fosse projetado desde o início com o intuito de reaproveitamento de peças ao fim da vida útil, em especial nos setores de construção e automotivos (MATERIAL ECONOMICS, 2020; SCOTT et al., 2020). Considerando intervenções no estágio de projeto dos produtos, a redução da quantidade de material utilizado para prover um mesmo serviço pode ser alcançada através de melhorias de propriedades do material, por sua substituição por materiais de menor impacto, com o uso

de ferramentas de otimização de projeto, ou até mesmo pela desmaterialização do serviço. (ALLWOOD et al., 2011)

A substituição de materiais pode se mostrar uma alternativa interessante no setor de embalagens, que hoje representa a maior demanda por materiais plásticos. Uma análise realizada em (MATERIAL ECONOMICS, 2018b), indica que pelo menos um quarto dos plásticos utilizados em embalagens pode ser substituído por fibras de madeira na forma prensada, cartonada ou em biocompósitos, o que permitiria uma redução de impactos de emissão de GEE's e da geração de resíduos, dado que estas fibras apresentam maiores índices de reciclagem que os plásticos. No setor de construção, metais e madeiras podem ser utilizados para substituição de perfis de janelas e portas ou nas tubulações. (SCOTT et al., 2020).

3 Metodologia

Como explicitado na sua introdução, o objetivo principal desta dissertação é testar a hipótese de que, sem políticas associadas a substituição e redução do uso de materiais, os cenários de descarbonização da economia mundial podem se mostrar não factíveis, devido à necessidade de oferta de materiais petroquímicos.

Com este propósito foi elaborado um modelo de simulação para estimar a demanda global de matérias-primas fósseis para fins não-energéticos a partir das demandas associadas a seus usos finais, englobando as principais aplicações do setor petroquímico apresentados na seção anterior, com foco no petróleo e gás natural. O carvão mineral também é incluído na avaliação, porém a análise se restringe a seu uso como insumo petroquímico, não incluindo a demanda de setores como cimento, alumínio e outros usos não-energéticos como carvão ativado e fibras de carbono, por exemplo.

O modelo proposto parte de resultados de cenários existentes, previamente modelados em análises de modelos de avaliação integrada (*Integrated Assessment Models – IAMs*), e, através do uso de variáveis *proxy* relacionadas aos diversos usos finais dos produtos avaliados, estima a demanda material de químicos básicos e correspondente demanda de matéria-prima fóssil em base energética associadas a estes usos. Essa estimativa da demanda de químicos básicos é feita com base em uma análise de fluxo de massa obtida a partir de (LEVI; CULLEN, 2018). A partir destes valores, a demanda de matéria-prima fóssil é obtida de dados típicos das reações de reforma e perfis de fontes materiais para produção de metanol e amônia (LEVI; CULLEN, 2018), enquanto valores médios globais de perfil de alimentação (GELDER, 2023) e de rendimentos por matéria-prima (AKAH;

AL-GHRAMI, 2015), em craqueadores a vapor, foram considerados para estimativa das demandas de HVCs.

Para verificação da hipótese proposta, o modelo desenvolvido foi aplicado aos cinco cenários ilustrativos de mitigação (IMPs) selecionados pelo grupo de trabalho III do sexto relatório de avaliação (AR6) IPCC (SHUKLA et al., 2022). Esses cenários representam possíveis caminhos de desenvolvimento que permitiriam o cumprimento da meta de elevação de temperatura para bem abaixo de 2 °C, preferencialmente limitando a 1,5°C, estabelecida no Acordo de Paris em 2015. A descrição dos cenários selecionados, bem como dos modelos utilizados em seu desenvolvimento é apresentada na seção 3.6.

É importante ressaltar que a escolha das variáveis *proxy* será particular para cada cenário/modelo a depender da disponibilidade de informações na base de dados do AR6 (BYERS et al., 2022). O modelo de simulação desenvolvido nesta dissertação, portanto, tem por objetivo utilizar as informações disponíveis para os cenários que melhor representem as demandas materiais que se deseja estimar. Quanto mais adequada for a variável selecionada, melhor a qualidade da estimativa realizada, porém a seleção da variável é limitada pela disponibilidade de dados. Não se trata, assim, de um modelo desenvolvido para simulação da demanda por petroquímicos, de forma isolada, mas sim de um modelo capaz de utilizar dados e resultados dos IAMs onde foram obtidas as IMPs, para realizar as estimativas de demanda e oferta de petroquímicos.

A Figura 1 ilustra a estrutura geral do modelo proposto, enquanto as seções que se seguem apresentam a sua descrição, incluindo dados de entrada, detalhamento das cadeias dos produtos considerados, equações utilizadas, principais parâmetros e resultados.

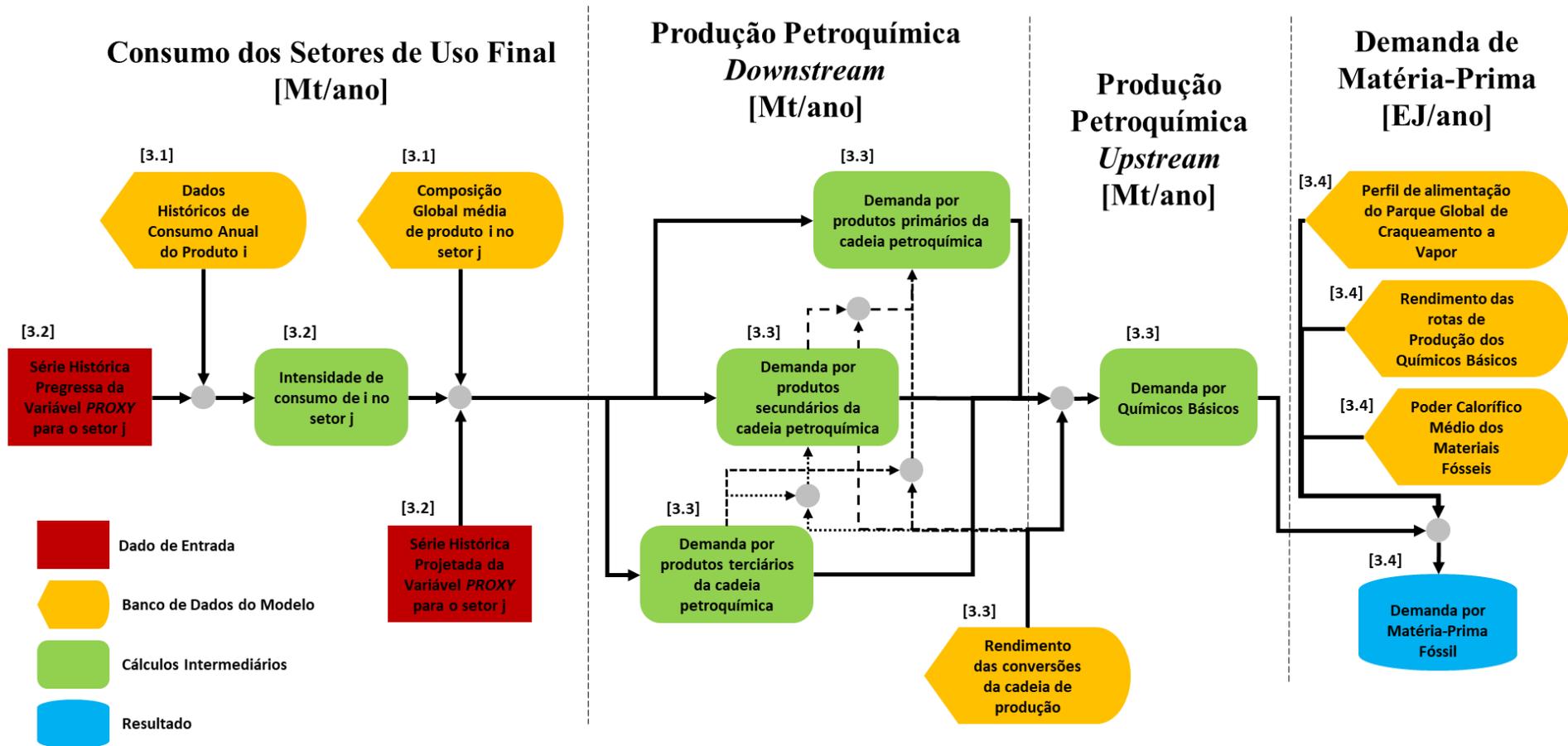


Figura 1 - Estrutura Geral do Modelo Proposto
Elaboração Própria

3.1 Dados Históricos e Detalhamento das Cadeias de Produtos

As próximas seções apresentam os detalhes dos setores de uso final, dados históricos de demanda e composição para cada um dos produtos apresentados na seção 2.3. Fontes de dados adicionais utilizadas no levantamento do histórico da demanda de termoplásticos e as matrizes de conversão dos produtos da cadeia petroquímica são apresentados no ANEXO I.

3.1.1 Termoplásticos

Apesar de a modelagem proposta neste estudo ser voltada para uma abordagem global, o levantamento de dados de demanda histórica realizado para os termoplásticos foi detalhado em nível país. Foram obtidas informações para 113 países, agrupados em 18 regiões compatíveis com o IAM COFFEE¹¹, do laboratório CENERGIA do PPE/COPPE-UFRJ, e balanceados com base em dados de escopo global (RYBERG et al., 2018).

Os dados utilizados neste levantamento foram obtidos a partir de diversas fontes, incluindo relatórios de associações da indústria de plásticos, polímeros ou petroquímica de diversos países, relatórios de organizações internacionais e artigos acadêmicos. A listagem completa de todas as fontes está disponível no ANEXO I. A Figura 2 apresenta a demanda global histórica por região para o período de 2006-2020 de acordo com o levantamento realizado.

¹¹ A compatibilização com a distribuição regional do COFFEE foi utilizada visando a possibilidade de uma futura integração do modelo desenvolvido nesta dissertação como um módulo de demanda petroquímica endógena ao IAM.

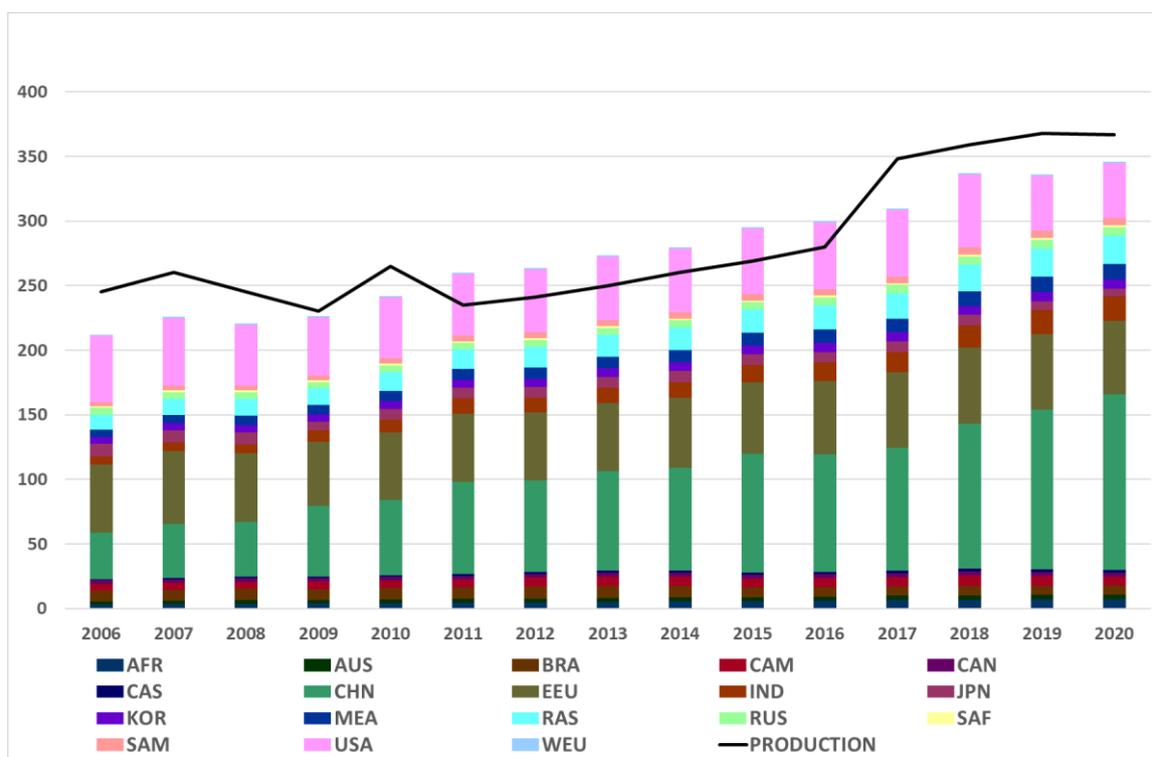


Figura 2 – Demanda Global de Termoplásticos por Região. ARF: África, AUS: Austrália e Nova Zelândia, BRA: Brasil, CAM: América Central, CAN: Canadá, CAS: Região do Mar Cáspio, CHN: China, EEU: Europa Ocidental, IND: Índia, JPN: Japão, KOR: Coreia do Sul, MEA: Oriente Médio, RAS: Resto da Ásia, RUS: Rússia, SAF: África do Sul, SAM: América do Sul, USA: Estados Unidos da América, WEU: Europa Oriental. Detalhes sobre as regiões no ANEXO I.

Elaboração Própria

Entre os principais usos dos termoplásticos estão os setores de embalagens, correspondente a aproximadamente 38% da demanda total (base mássica) na média do período avaliado. Em seguida vêm os setores de construção civil (18%), onde os plásticos são utilizados para isolamento térmico e tubulações e perfis de portais e janelas; automotivo (6%) e eletroeletrônicos (7%), nos quais os plásticos são utilizados na

produção de diversos componentes (PLASTICSEUROPE, 2020). A Figura 3 apresenta a demanda histórica global por setor de uso final.

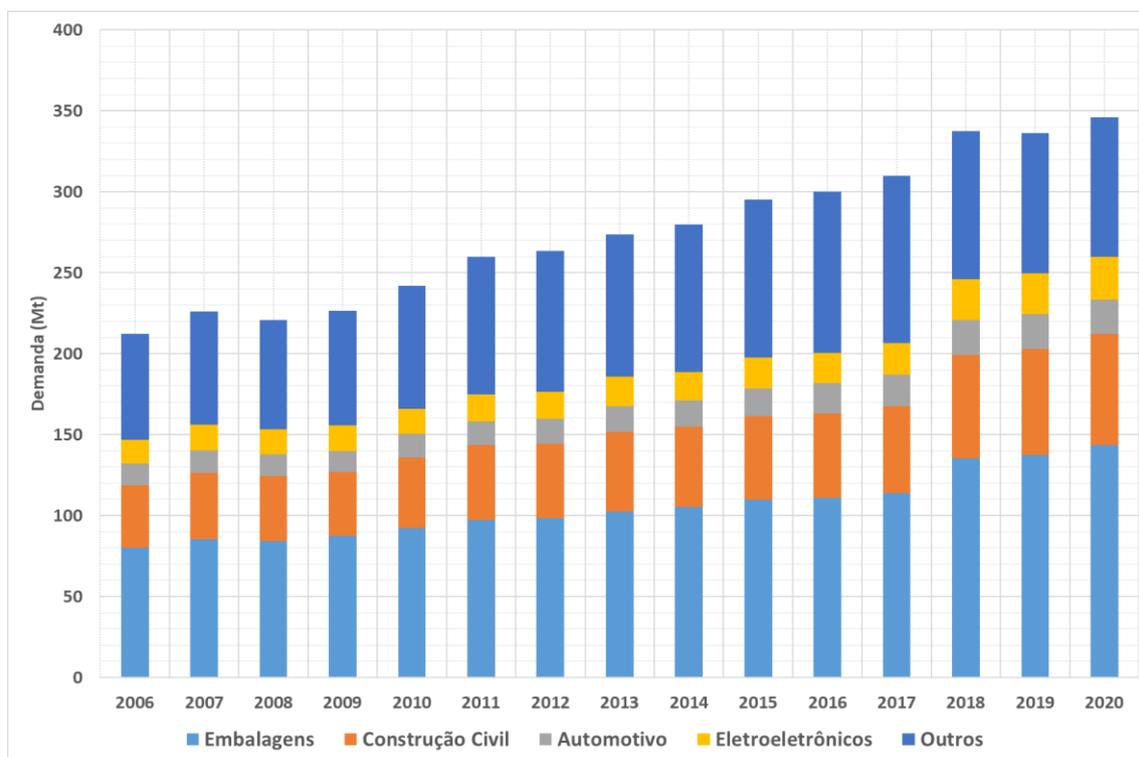


Figura 3 – Demanda Global de Termoplásticos por Setor de Uso Final.
Elaboração Própria

O restante da demanda é distribuído por uma série de setores com menor impacto na demanda de forma isolada. Juntos, porém, representam em média, no período analisado, 31% da demanda total de termoplásticos. Entre esses setores, encontram-se as demandas relativas à produção de tecnologias associadas à transição energética, como conversores eólicos e fotovoltaicos e veículos elétricos leves.

A partir de uma análise preliminar para o ano de 2020 para essas três tecnologias com base em dados de inserção tecnológica de IEA (2020) e intensidades materiais baseadas

em CARRARA et al., 2020 e MENG et al., 2023, é possível mostrar, utilizando a metodologia utilizada neste estudo, que a demanda diretamente associada a elas em 2020 ainda representa uma fração residual da demanda total por químicos básicos, correspondente a menos de 0,2% em massa do consumo total. Desta forma, o modelo proposto inclui a opção de análise de variáveis *proxy* relativas à introdução dessas tecnologias, porém suas respectivas estimativas de demanda de termoplásticos serão somadas ao total em projeções futuras baseadas nos resultados dos IAMs, o que se mostra especialmente útil na análise de resultados de cenários com propostas de alta eletrificação.

O seguinte tratamento é dado para os principais setores de uso final dos termoplásticos:

- Embalagens: O setor de embalagens atende a uma série de segmentos, sendo o mais representativo o setor de bebidas e alimentos, seguido de cuidados pessoais e domésticos e farmacêuticos (GRAND VIEW RESEARCH, 2023). Em especial, os setores de alimentos e bebidas e cuidados pessoais e domésticos estão associados ao consumo familiar, portanto a variável *proxy* para representação deste setor será o PIB/capita¹²;
- Construção Civil: O consumo de plástico neste setor pode ser diretamente associado a área construída, e, exceto onde indicado em contrário, os valores de área construída residencial e comercial obtidos nos cenários selecionados serão considerados como *proxies* do setor. Como nem todos os resultados das análises de IAMs disponibilizam esse dado, em sua ausência, variáveis correlatas ao nível de atividade do setor construtivo, como produção de cimento ou consumo de energia final do setor residencial/comercial, poderão ser utilizadas;

¹² Este indicador é utilizado pela ABIQUIM em suas projeções (ABIQUIM, 2014).

- Automotivo: De forma análoga ao setor de construção, a variável ideal para representação deste setor seria o tamanho da frota adicionada. Devido à dificuldade de obtenção deste dado diretamente dos resultados das análises de IAMs, a demanda por serviço energético do setor automotivo em passageiro-km ou veículo-km podem ser utilizadas como *proxy*. Para este setor, é interessante haver a disponibilidade de penetração das tecnologias de veículos elétricos, caso haja interesse em analisar as demandas associadas à transição energética. Caso essa informação não esteja disponível diretamente, será considerada a razão do uso de eletricidade como energia final no setor de transporte de passageiros como aproximação;
- Eletroeletrônicos: Por estar associado a diversos aparelhos de uso doméstico e particular, como smartphones, tablets, computadores, eletrodomésticos, aparelhos de TV, entre outros produtos, este setor também será representado pela proxy PIB/capita;
- Geradores eólicos e fotovoltaicos: Sempre que a informação estiver disponível nos IAMs, a participação destes geradores na demanda material estará atrelada as suas respectivas capacidades adicionadas;
- Outros: Seguindo a tendência do levantamento histórico realizado, os demais setores de uso final não detalhados representarão uma fatia de 31% da demanda total, em massa.

Os principais polímeros em termos de demanda de termoplásticos são o polietileno, somando 30% da demanda total em massa, dividido em seus graus de alta e baixa densidade (HDPE (13%) e LDPE/LLDPE (17%)), polipropileno (PP) (21%), cloreto de

polivinila (PVC) (15%), polietileno tereftalato (PET) (7%) e poliestireno (PS) (6%). A

Figura 4 apresenta a demanda histórica global por tipo de polímero.

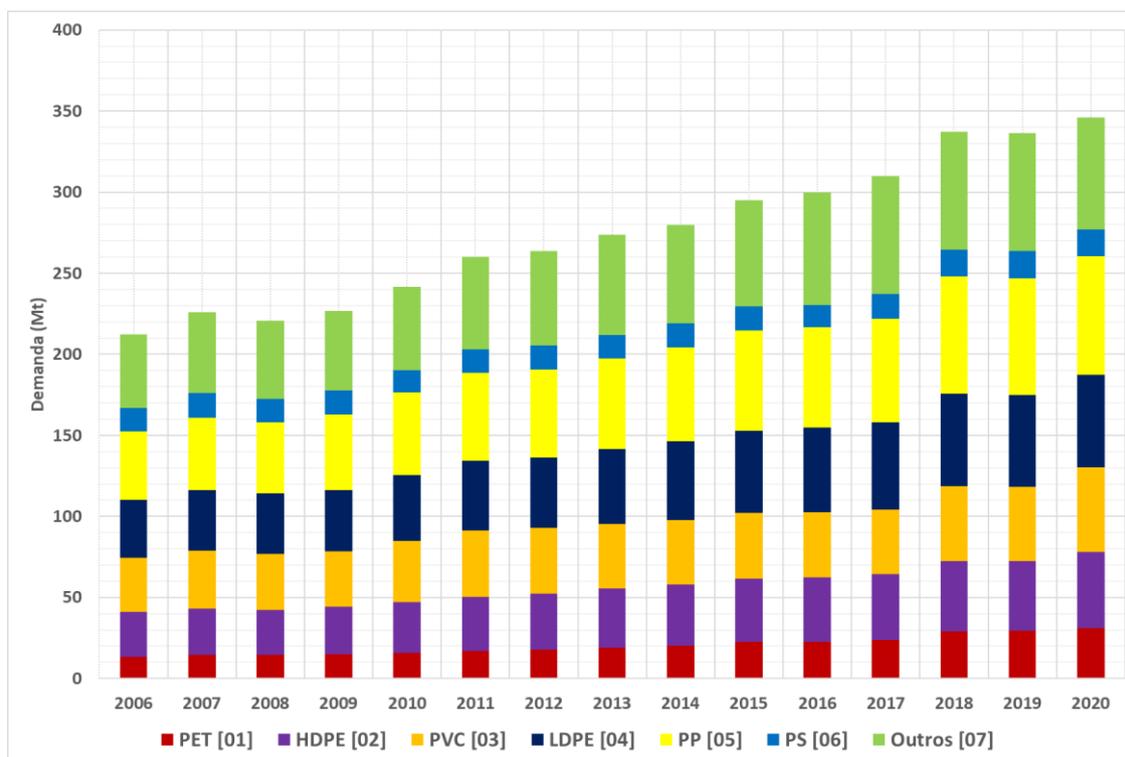


Figura 4 – Demanda Global de Termoplásticos por Polímero. PET: Polietileno Tereftalato, HDPE: Polietileno de Alta Densidade, PVC: Cloreto de Polivinila, LDPE: Polietileno de Baixa Densidade, PP: Polipropileno, PS: Poliestireno
Elaboração Própria

Com base no levantamento de dados realizado, foram estimadas as composições de cada um dos setores tradicionais de uso final analisados, conforme disposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Participações dos compostos associadas aos setores de uso final

	Embalagens	Construção Civil	Automotivo	Eletroeletrônicos	Outros
PET [01]	22%	0%	0%	0%	0%
HDPE [02]	19%	14%	9%	4%	9%
PVC [03]	5%	49%	5%	12%	9%
LDPE [04]	26%	5%	1%	10%	15%
PP [05]	20%	6%	33%	22%	31%
PS [06]	3%	6%	0%	9%	6%
Outros [07]	5%	20%	52%	42%	30%

Uma composição média foi atribuída ainda ao conjunto de outros compostos utilizados na cadeia de termoplásticos, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Participação média dos outros compostos da cadeia dos termoplásticos

Composto	Percentual
ABS	35%
Policarbonato [PC]	15%
Poliamida [PA]	13%
Diocetil Ftalato [DOP]	11%
Acetato de Polivinila [PVAc]	10%
Polimetilmetacrilato [PMMA]	8%
Metil Metacrilato [MMA]	4%
Ácido Isoftálico	2%
Estireno Acrilonitrilo [SAN]	2%

Com relação aos equipamentos de conversão, geradores eólicos possuem polietileno tereftalato (PET) e cloreto de polivinila (PVC) em sua composição com teores de 13% e 43%, respectivamente, do total de materiais plásticos de sua composição, com o restante referente a termofixos (epóxis e poliuretanos). Já os geradores solares fotovoltaicos utilizam etileno acetato de vinila (EVA), com teores de 72% de etileno e 28% de acetato de vinila. Esse composto representa 67% do material plástico destes geradores, com o restante referente a Fluoreto de Polivinila (PVF), cuja rota principal não deriva dos

químicos básicos (WORLD HEALTH ORGANIZATION.; INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER., 2008). Além disso, a mudança da frota de veículos leves de combustão interna para veículos elétricos a bateria também implica num aumento da intensidade de consumo de plásticos no setor automotivo em torno de 10% (MENG et al., 2023). A Tabela 3 apresenta as composições de termoplásticos consideradas para os geradores eólicos e fotovoltaicos. Para os veículos elétricos, será considerada a mesma composição do setor automotivo, apenas com o incremento na intensidade descrito acima.

Tabela 3 – Participação dos comportos associada aos geradores eólicos e fotovoltaicos

	Geradores Eólicos	Geradores Fotovoltaicos
PET [01]	23%	-
PVC [03]	77%	-
Etileno	-	48%
Acetato de Vinila	-	19%
PVF	-	33%

3.1.2 Fibras Sintéticas

O consumo de fibras sintéticas está diretamente associado ao mercado de roupas, acessórios e utensílios domésticos (OPPERSKALSKI et al., 2022). A produção destas fibras teve seu crescimento intensificado especialmente a partir do início dos anos 2000 como descrito anteriormente, na seção 2.3.1.2. Este crescimento é apresentado na Figura 5.

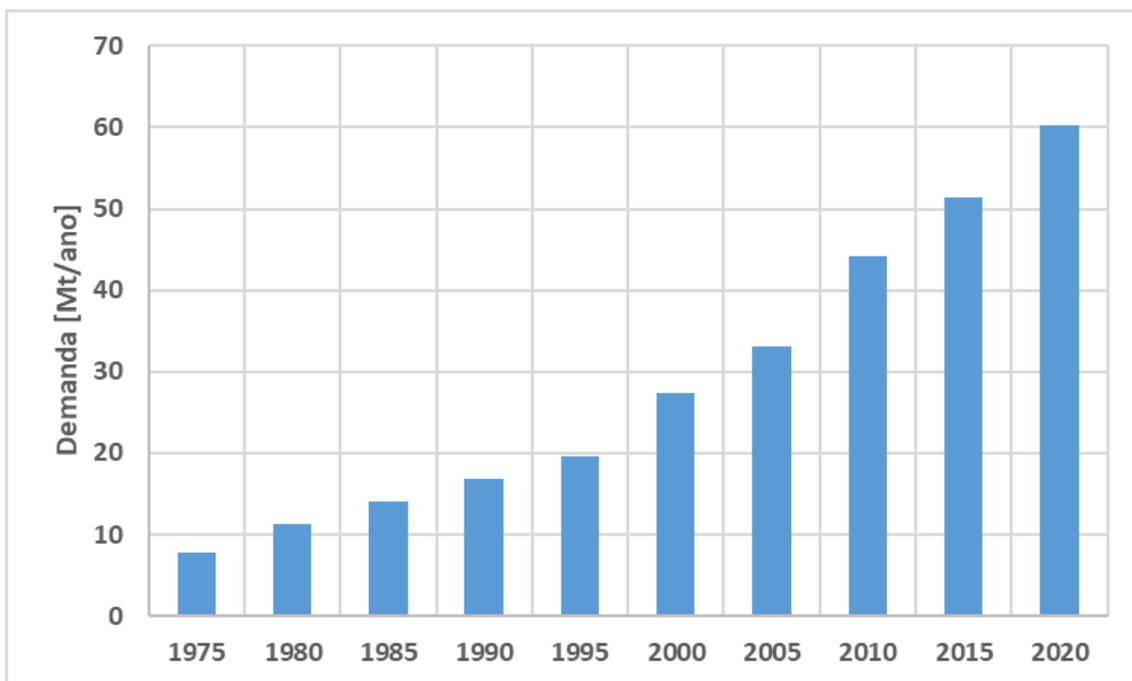


Figura 5 – Demanda Global de Fibras Sintéticas
Elaboração Própria baseada em (OPPERSKALSKI et al., 2022)

Assim como para os setores de embalagens e eletroeletrônicos para os termoplásticos, a variável PIB/capita será utilizada como referência para as estimativas de demanda de fibras sintéticas, uma vez que este setor também é fortemente influenciado pelo consumo familiar.

A Tabela 4 apresenta a participação de cada um dos compostos avaliados no estudo para as fibras sintéticas.

Tabela 4 – Participações dos polímeros e demais compostos para as fibras sintéticas (LEVI; CULLEN, 2018; OPERSKALSKI et al., 2022)

Composto	Percentual
Poliéster [PET]	85%
Poliamidas [PA]	8%
Polipropileno [PP]	4%
Policacrilonitrila [PAN]	2%

3.1.3 Fertilizantes Nitrogenados

Para os fertilizantes nitrogenados, idealmente, a demanda será extraída diretamente dos IAMs, quando este parâmetro estiver disponível. É comum que este dado seja apresentado em unidades de tN/ano, e, portanto, a demanda total dos compostos deve ser ajustada para tonelada de produto a partir de seus respectivos teores de nitrogênio.

Para os casos em que esta informação não seja obtida diretamente do modelo, um *proxy* será utilizado com base na produção agrícola ou, em último caso, projeções populacionais, com a intensidade de uso de fertilizante baseada em dados de consumo anual de fertilizantes nitrogenados da FAO (FAO, 2023), conforme Figura 6.

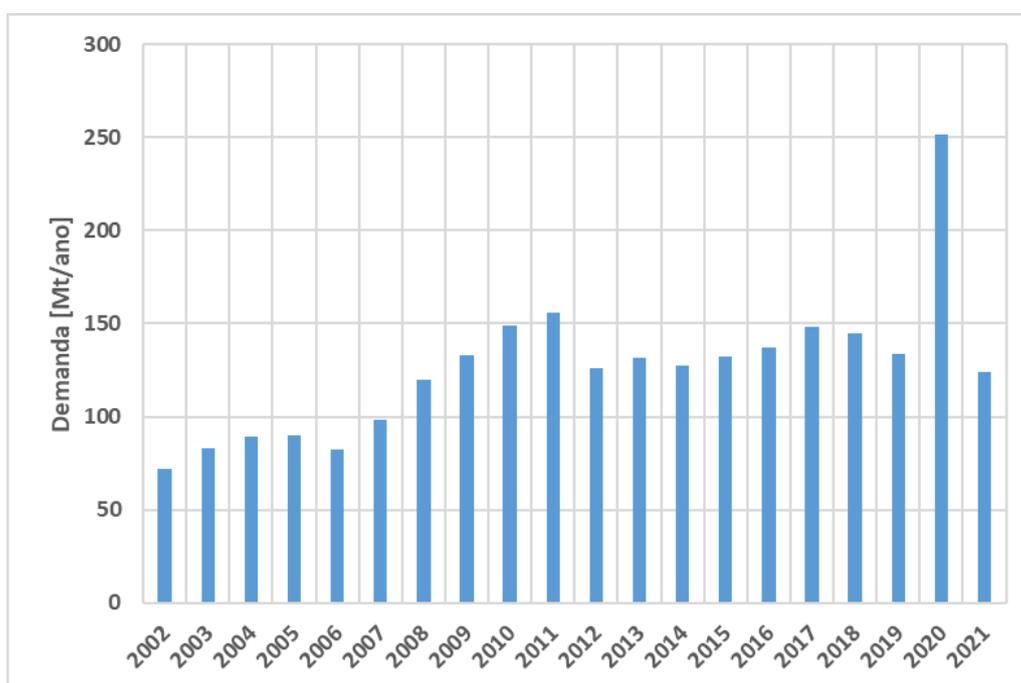


Figura 6 – Consumo Global de Fertilizantes Nitrogenados

Elaboração Própria baseada em (FAO, 2023)

Como pode ser observado, o valor de consumo global para o ano de 2020 na série histórica apresentada se encontra muito discrepante dos demais valores da série. Durante a elaboração do modelo foi considerado que houve uma dupla contagem deste dado, trazendo o valor para 125 Mt/ano, compatível com os demais dados.

A participação por tipo de Fertilizante também será baseada nesta mesma base de dados, e, para 2020, a Tabela 5 apresenta a proporção considerada para cada composto em base mássica de produtos (FAO, 2023). O teor de nutriente em massa, para cada produto foi obtido a partir da base de dados da IFA (IFA, 2023)

Tabela 5 – Participação dos compostos nos Fertilizantes Nitrogenados e teores de N
(FAO, 2023; IFA, 2023)

Composto	Percentual	Teor de N
Ureia	72%	46%
Fosfato de Diamônio [DAP]	10%	18%
Nitrato de Amônio e Uréia [UAN]	7%	30%
Sulfato de Amônio	4%	21%
Nitrato de Cálcio e Amônio	3%	27%
Amônia	2%	82%
Fosfato de Monoamônio [MAP]	2%	11%
Nitrato de Amônio	2%	34%

3.1.4 Aditivos e componentes de combustíveis

Devido às características de teor de consumo, conforme apresentado no item 2.3.3, os compostos que apresentam alta demanda em escala global, nesta categoria, são os componentes de combustíveis, representados em LEVI; CULLEN, 2018 por metanol, butenos (1, 2 e iso) e MTBE. A Figura 7 apresenta dados de produção global de MTBE (STATISTA, 2023).

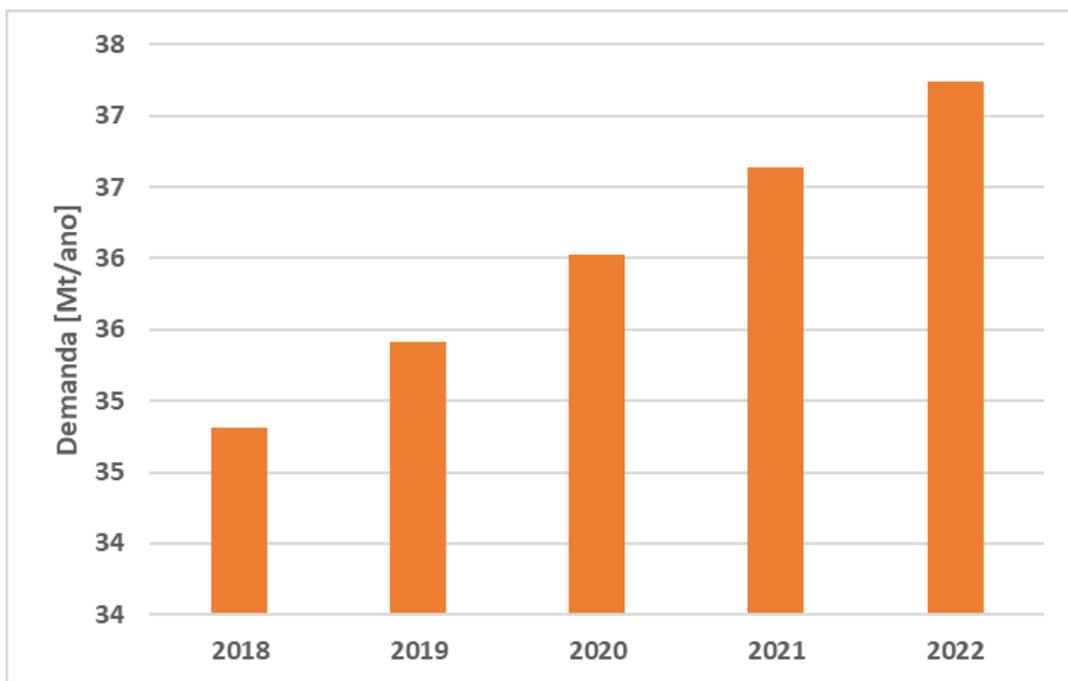


Figura 7 – Produção Global de MTBE
Elaboração Própria baseada em (STATISTA, 2023)

Não foram encontrados dados de produção ou demanda de butilenos, desta forma, para a modelagem, será considerada uma proporção fixa de metanol/MTBE/butenos, de 12%/26%/62% (LEVI; CULLEN, 2018). Ainda, os butenos serão mantidos na proporção presente nesta mesma referência: 33% 1-buteno, 35% 2-buteno e 32% isobuteno. Para a presente modelagem, será considerado o uso integral do MTBE para misturas de combustível.

Todos estes compostos são atrelados ao consumo de gasolina, portanto, esta variável será utilizada preferencialmente como *proxy* para estimativa de suas respectivas demandas. Na indisponibilidade desta informação, poderá ser utilizada a energia final do setor de transportes para líquidos derivados de petróleo.

3.1.5 Demais aplicações

A estimativa de consumo das demais aplicações serão obtidas a partir de suas respectivas participações na produção total do setor petroquímicos, de acordo com a análise de LEVI; CULLEN, 2018, conforme Tabela 6

Tabela 6 – Participação das demais aplicações na Cadeia Petroquímica (LEVI; CULLEN, 2018)

Aplicação	Percentual
Resinas Termofixas	5%
Elastômeros	1%
Solventes	2%
Outras Aplicações	13%

Os itens a seguir descrevem as composições aplicadas e detalhes adicionais, quando aplicável, adotados para estas aplicações.

3.1.5.1 Resinas Termofixas

A Tabela 7 apresenta a composição típica utilizada para as resinas termofixas.

Tabela 7 – Participação dos compostos considerados para as resinas termofixas (LEVI; CULLEN, 2018)

Composto	Percentual
Formaldeído	21%
Ureia	20%
Óxido de Propileno	16%
Metileno Difênol Diisocianato [MDI]	10%
Fenol	8%
Acetona	5%
Tolueno Diisocianato [TDI]	5%
Anidrido Maleico	4%
Bisfenol A	4%
Anidrido Ftálico	3%

Composto	Percentual
Melamina	3%
Ácido Isoftálico	1%

3.1.5.2 Elastômeros

A Tabela 8 apresenta os compostos e suas participações consideradas para os elastômeros.

Tabela 8 – Participação dos compostos considerados para os elastômeros (LEVI; CULLEN, 2018)

Composto	Percentual
Estireno Butadieno [SBR]	52%
Polibutadieno [BR]	36%
Nitrilo Butadieno [NBR]	8%
Policloropreno	4%

3.1.5.3 Solventes

A Tabela 9 apresenta a participação dos compostos utilizados como solventes.

Tabela 9 – Participação dos compostos considerados para os solventes (LEVI; CULLEN, 2018)

Composto	Percentual
Tolueno	50%
Ácido Acético	24%
Metanol	22%
Ciclohexano	4%

3.1.5.4 Explosivos

Entre os compostos detalhados no estudo, apenas o nitrato de amônio compõe o setor de explosivos diretamente em quantidades consideráveis (LEVI; CULLEN, 2018). Para a

modelagem será considerado que 35% da demanda total deste composto é utilizada em explosivos, com o restante sendo utilizado como fertilizante (LEVI; CULLEN, 2018; S&P GLOBAL, 2022a).

3.1.5.5 Outras aplicações

Além das aplicações citadas anteriormente, a cadeia de produção petroquímica inclui uma série de outros produtos que apresentam margens menores de participação, porém, em conjunto, correspondem a 13% da demanda total de insumos. Uma participação típica de compostos para estas aplicações será utilizada no modelo, de acordo com os dados de LEVI; CULLEN, 2018, detalhada na Tabela 10

Tabela 10 – Participação dos compostos considerados para os demais produtos da cadeia petroquímica (LEVI; CULLEN, 2018)

Composto	Percentual
Metanol	13,9%
Amônia	13%
Etileno	6,7%
Propileno	6,7%
2-Buteno	5,3%
Formaldeído	5%
Estireno	4,7%
1-Buteno	4,3%
Uréia	3,4%
Butadieno	3,2%
Ácido Acético	3,2%
Acetato de Vinila	3,1%
Isobuteno	3%
Etilenoglicol	3%
Ácido Nítrico	2,1%
Fenol	1,8%
Tolueno	1,7%
m-Xileno	1,7%
Cloreto de Vinila	1,5%
Óxido de Propileno	1,3%
Benzeno	1,2%

Composto	Percentual
Álcool 2-Etil Hexil	1,2%
Sulfato de Amônio	1,1%
Ácido Adípico	1,1%
Anidrido Ftálico	1%
Butano	0,9%
Anilina	0,8%
Acrilonitrila	0,7%
Fosfato de Diamônio	0,6%
Fosfato de Monoamônio	0,5%
Ácido Tereftálico Purificado	0,5%
Acetona	0,3%
Anidrido Maleico	0,3%
o-Xileno	0,2%
Caprolactama	0,2%
Dioctil Ftalato	0,2%
Metilmetacrilato	0,2%
Tolueno Diisocianato	0,2%
p-Xileno	0,1%
Bisfenol A	0,1%

Como forma de ilustrar as ordens de grandeza relativas entre as diversas aplicações do setor petroquímico, a Tabela 11 apresenta suas demandas em massa de acordo com o levantamento realizado por LEVI; CULLEN, 2018 para o ano de 2013.

Tabela 11 – Demandas globais para as aplicações do setor petroquímico - 2013

(LEVI; CULLEN, 2018)

Aplicação	Demanda [Mt/ano]
Termoplásticos	222,2
Fibras Sintéticas	54,1
Fertilizantes Nitrogenados	274,7
Aditivos e Componentes de Combustíveis	62,5
Resinas Termofixas	42,7
Elastômeros	10,6
Solventes	16,3
Explosivos	16,7
Outras Aplicações	104,6

3.2 Intensidades Materiais e Projeção das Demandas Setoriais

As intensidades de consumo em base mássica para cada aplicação ou setor de uso final são obtidas através de regressões lineares, quando existem dados históricos disponíveis para um período superior a dois anos, na forma:

$$I_{i,j} = b_{i,j} \frac{C_{i,j}}{P_j} + a_{i,j} \quad [1]$$

onde,

$I_{i,j}$ – Intensidade Material do produto i no setor j [Mt produto/unidade da variável *proxy*];

$C_{i,j}$ – Consumo anual de produto i no setor j [Mt produto/ano];

P_j – Nível de atividade anual da variável *proxy* para o setor j [Unidade da variável *proxy*/ano];

$a_{i,j}$ – Intensidade material mínima do produto i no setor j [Mt produto/unidade da variável *proxy*];

$b_{i,j}$ – Elasticidade intensidade material-atividade da variável *proxy* do produto i no setor j [Unidade da variável *proxy*/ Mt produto].

Para produtos em que apenas dados do ano base estiverem disponíveis, a intensidade é obtida a partir diretamente a partir da razão consumo do produto/atividade da variável *proxy*:

$$I_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{P_j} \quad [2]$$

O cálculo da intensidade material a partir do ano base foi adotado em mais duas situações:

- Presença de apenas dois pontos de dados disponíveis na série histórica. Esta medida foi adotada para evitar a geração de distorções decorrentes de correlações baseadas em apenas dois pontos;
- Casos em que o coeficiente de correlação R^2 calculado fosse inferior a 0,9.

Com base nas intensidades calculadas, é possível obter as demandas materiais de cada aplicação ou setor de uso final, nos anos projetados em um dado cenário de interesse a partir de:

$$D_{i,j,t} = k_t I_{i,j} P_{j,t} \quad [3]$$

onde,

$D_{i,j,t}$ – Demanda Material do produto i no setor j projetada para o ano t pelo cenário analisado [Mt produto/ano];

k_t – Fator de ajuste da demanda para o ano t [adimensional, $0 \leq k_t \leq 1$]

O fator de ajuste k_t permite a introdução de efeitos de impactos das narrativas dos cenários analisados nas intensidades das demandas materiais, como aumento de eficiência material, desmaterialização e deslocamentos de demanda fóssil virgem em razão de aumento da participação de biomateriais, e-materiais e/ou reciclagem.

Finalmente, para evitar que as demandas projetadas sejam superestimadas nas aplicações e setores de uso final baseados em GDP/capita, foi considerada uma convergência do consumo per capita de plásticos para embalagens e eletroeletrônicos, bem como fibras sintéticas, para níveis compatíveis com o consumo médio de países da OCDE (OECD, 2023b, 2023c, 2023d). É válido mencionar que mesmo dentro dos países OCDE existem grandes variações de nível de consumo, tendo como extremos a região da Oceania e os Estados Unidos da América, com consumos de 4,38 Mt/ano e 84,31 Mt/ano, respectivamente.

Estes cálculos são aplicados para os setores de uso final dos termoplásticos (Embalagens, Construção Civil, Automotivo, Eletroeletrônicos e Renováveis), fibras sintéticas, fertilizantes nitrogenados e componentes de combustíveis. As estimativas das demais aplicações são obtidas a partir de suas respectivas participações na produção anual, conforme descrito no item 3.1.5.

A Figura 8 sumariza o procedimento de cálculo das Demandas setoriais.

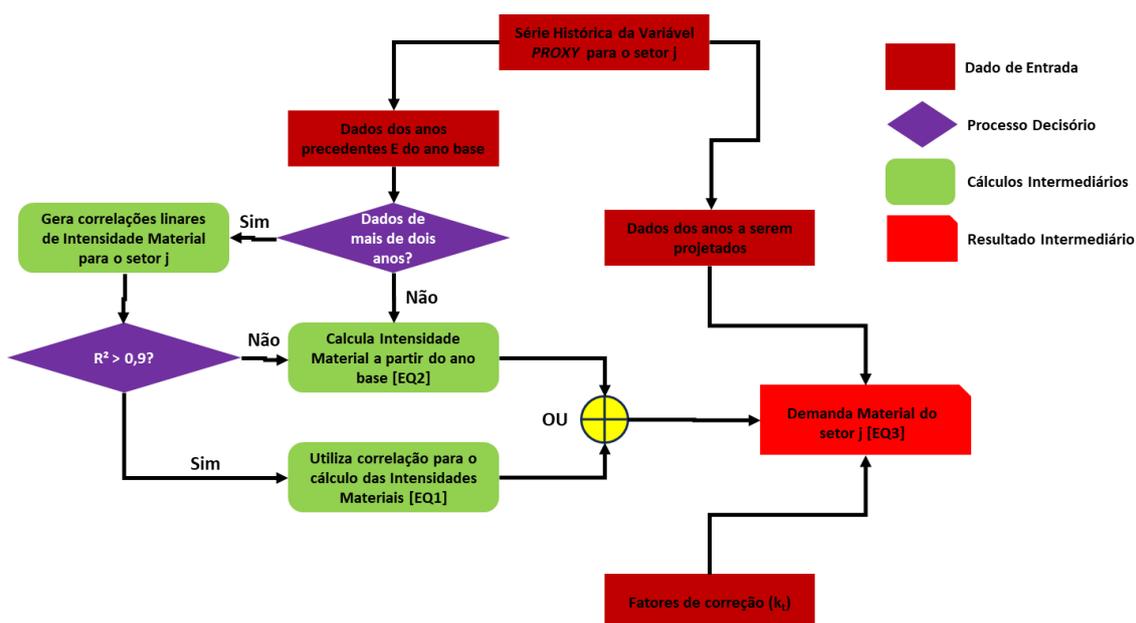


Figura 8 – Procedimento para estimativa das Demandas Setoriais

Fonte: Elaboração própria

3.3 Demanda de Químicos Básicos

Uma vez estimadas as demandas materiais dos setores e aplicações analisados, é possível obter a demanda equivalente de químicos básicos partindo de suas respectivas composições, apresentadas na seção 3.1. Para este estudo, foram considerados os fluxos materiais de produção de 54 produtos e intermediários da cadeia petroquímica, mapeados em LEVI; CULLEN, 2018. Os compostos intermediários são classificados em 3 níveis, correspondendo à quantidade de transformações necessárias para suas obtenções. A Tabela 12 lista cada um destes compostos, de acordo com sua classificação, além dos químicos básicos. Todos estes compostos apresentavam uma produção estimada maior ou igual a 400.000 t/ano em 2013.

Tabela 12 – Compostos considerados no fluxo material

Produtos Terciários	Produtos Secundários	Produtos Primários	Químicos Básicos
Acetato de Polivinila [PVAc]	Acetato de Vinila	Acetona	Amônia
Metileno Difenil Diisocianato [MDI]	Ácido Adípico	Ácido Acético	Benzeno
Nitrato de Amônio e Cálcio [CAN]	Acrilonitrila Butadieno Estireno [ABS]	Ácido Isoftálico	Butadieno
Nitrato de Amônio e Ureia [UAN]	Anilina	Ácido Nítrico	Butano
Poliamida 6 [PA 6]	Bisfenol A	Ácido Tereftálico	Butenos
Poliamida 66 [PA 66]	Caprolactama	Acrilonitrila	Etileno
Policarbonato	Cloreto de Polivinila [PVC]	Adiponitrila	Metanol
Polimetilmetacrilato [PMMA]	Diocil Ftalato [DOP]	Álcool 2-etil-hexil	m-Xileno
	Estireno Acrilonitrilo [SAN]	Anidrido Ftálico	o-Xileno
	Estireno Butadieno [SBR]	Anidrido Maleico	Propileno
	Hexametilenodiamina	Ciclohexano	p-Xileno
	Melamina	Cloreto de Vinila	Tolueno
	Metil Metacrilato [MMA]	Cloropreno	
	Nitrato de Amônio	Dimetil Tereftalato	
	Nitrilo Butadieno [NBR]	Estireno	
	Poliacrilonitrila [PAN]	Fenol	
	Poliestireno [PS]	Formaldeído	
	Polietileno Tereftalato [PET]	Fosfato Diamônico [DAP]	
	Tolueno Diisocianato [TDI]	Fosfato Monoamônico [MAP]	
		Metil Tert Butil Éter [MTBE]	
		Monoetilenoglicol [MEG]	
		Óxido de Propileno	
		Polibutadieno [BR]	

Produtos Terciários	Produtos Secundários	Produtos Primários	Químicos Básicos
		Polietileno [PE]	
		Polipropileno [PP]	
		Sulfato de Amônio	
		Ureia	

As composições apresentadas ao longo da seção 3.1 podem apresentar componentes de todos os níveis de produtos intermediários, bem como químicos básicos. Assim, a primeira etapa para obtenção das demandas de químico básicos é a organização das demandas materiais proporcionais de cada um destes compostos em vetores segregados por classificação de nível de produtos.

Estes vetores iniciais são multiplicados por matrizes de conversão das reações de produção, para obtenção dos diversos níveis intermediários no vetor de químicos básicos. A equação [4] ilustra o cálculo da demanda de intermediários secundários a partir do vetor inicial de intermediários terciários:

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{21} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_{21} \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_{10} \end{bmatrix}_{k-1} \begin{bmatrix} r_{t1,s1} & \cdots & r_{t10,s1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{t1,s21} & \cdots & r_{t10,s21} \end{bmatrix} \quad [4]$$

onde,

s_i – Demanda material do i -ésimo composto secundário [Mt produto i /ano];

t_j – Demanda material do j -ésimo composto terciário [Mt produto j /ano];

$r_{j,i}$ – Demanda de i -ésimo composto secundário para a produção do j -ésimo composto terciário [Mt produto i /Mt produto j];

Operações análogas são realizadas para conversão de compostos terciários e secundários em primários, bem como de secundários e primários em químicos básicos. As razões de conversão de massas foram obtidas a partir do balanço proposto em LEVI; CULLEN, 2018. A Figura 9 ilustra o procedimento desta etapa de cálculo.

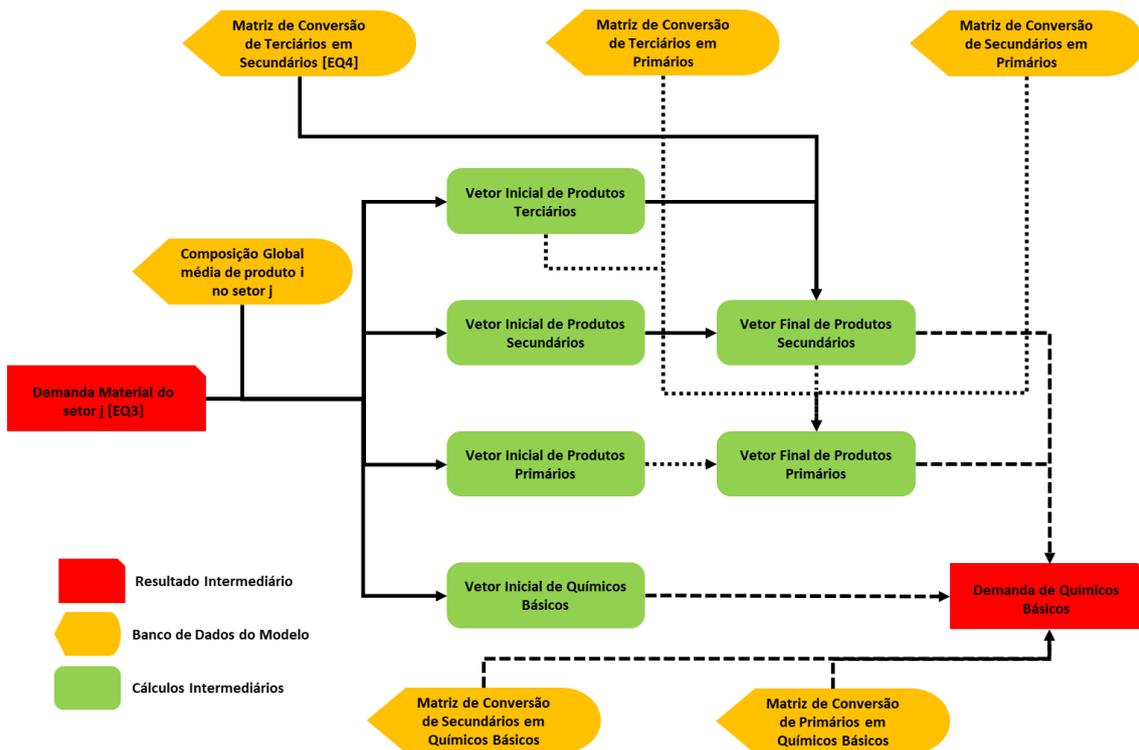


Figura 9 – Procedimento para estimativa das Demandas de Químicos Básicos

Fonte: Elaboração própria

As matrizes de conversão dos vários níveis de produtos intermediários estão disponíveis no ANEXO I.

3.4 Demanda de Matéria-Prima Fóssil

De posse das demandas de químicos básicos, é possível estimar a demanda de matéria-prima fóssil (carvão, petróleo e gás natural) necessária para a produção destes montantes.

Para tanto, são necessárias as seguintes informações:

- Rendimentos mássicos das principais rotas de produção de amônia, metanol e HVCs;
- Participação percentual de cada uma das matérias-primas na produção global de químicos básicos.

3.4.1 Metanol e Amônia

Conforme disposto na seção 2.2 estes dois compostos têm como principal rota de produção, o gás de síntese obtido da reforma a vapor. Assim como para as estimativas de demanda dos químicos básicos, a estimativa de matéria-prima fóssil necessária para suprir as demandas de metanol e amônia utilizada nesta modelagem, segue a análise apresentada em LEVI; CULLEN, 2018.

A primeira etapa, consiste na aplicação dos percentuais de participação na produção total de metanol e amônia, das matérias-primas fósseis, aqui categorizadas em três grandes grupos (carvão, gás natural e petróleo), conforme disposto na Tabela 13

Tabela 13 – Participação das Matérias-Primas fósseis na produção de Amônia e Metanol (LEVI; CULLEN, 2018)

Matéria-Prima	Metanol	Amônia
Carvão	17%	21%
Derivados de Petróleo	80%	70%
Gás Natural	3%	9%

Em seguida, são estimadas as massas de H₂ e CO necessárias para a síntese de metanol e amônia. As reações de síntese destes compostos são:



Assim, as massas dos reagentes derivados do gás de síntese, podem ser obtidas a partir da equação [5]

$$m_i = \frac{r_{i,j} \times m_j}{\eta_c} \quad [5]$$

onde,

m_i – Demanda anual do reagente i [Mt reagente i /ano];

$r_{i,j}$ – razão mássica do reagente i para produção o composto j [Mt reagente i /Mt composto j];

m_j – Demanda anual do composto j [Mt composto j /ano];

η_c – eficiência média da reação de síntese [%];

i – reagente [H_2 ou CO];

j – composto final [CH_3OH ou NH_3];

As razões mássicas $r_{i,j}$ são obtidas a partir dos coeficientes estequiométricos e das massas molares dos compostos de interesse, levando aos valores apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – razões mássicas $r_{i,j}$

Reagente/Composto	$r_{i,j}$
H_2/CH_3OH	0,13
CO/CH_3OH	0,88
H_2/NH_3	0,18

Além disso, as eficiências médias das reações de síntese (η_c) de metanol e amônia utilizadas foram de 99% e 98%, respectivamente (LEVI; CULLEN, 2018).

Finalmente, para a estimativa das demandas de matéria-prima fóssil devem ser aplicadas as suas respectivas eficiências das reações de gás de síntese. Entretanto, devido à natureza amorfa das matérias-primas em questão, é difícil obter uma eficiência mássica que represente os diversos caminhos possíveis para alcançar o gás de síntese a partir das misturas complexas destes hidrocarbonetos. Assim, a abordagem utilizada em LEVI;

CULLEN, 2018 se baseia no uso da Lei de Hess, que dita que o calor liberado ou absorvido em um dado processo químico é o mesmo, independentemente da quantidade de etapas nas quais este ocorre, o que é consistente com o fato de a energia ser uma função de estado. As eficiências então são aplicadas em base energética a partir dos poderes caloríficos superiores (PCS) das substâncias envolvidas através da equação [6].

$$d_f = \frac{\left(\frac{m_{CO}}{PCS_{CO}} + \frac{m_{H_2}}{PCS_{H_2}} \right)}{\eta_s} \quad [6]$$

onde,

d_f – Demanda energética anual da matéria-prima f [PJ matéria-prima f/ano];

m_{CO/H_2} – Demanda material do componente do gás de síntese [Mt];

PCS_{CO/H_2} – Poder Calorífico Superior do componente do gás de síntese [GJ/t];

η_s – eficiência média da reação de produção de gás de síntese [%];

f – matéria-prima fóssil [carvão, derivados de petróleo ou gás natural];

A Tabela 15 apresenta as propriedades necessárias para as estimativas de cada uma das matérias-primas fósseis, bem como os PCS dos componentes do gás de síntese. Para a estimativa em massa das matérias-primas fósseis, as demandas energéticas obtidas devem ser calculadas a partir de seus respectivos PCS.

Tabela 15 – Propriedades dos componentes do gás de síntese e das matérias-primas
(LEVI; CULLEN, 2018)

Componente ou Matéria-Prima	PCS [GJ/t]	η_s [%]
Carvão	28,2	76
Petróleo	50,7	86
Gás Natural	45,3	81
H ₂	141,8	-
CO	10,1	-

3.4.2 HVCs

A estimativa da demanda de matéria-prima fóssil para produção de HVCs é realizada considerando apenas a tecnologia de craqueamento a vapor, com base nas demandas anuais calculadas para o etileno, principal produto desta rota, conforme descrito na seção 2.2.1. Com os valores estimados, é possível estabelecer os excedentes ou déficits dos demais HVCs (propileno, C4s e BTX).

Assim como para os processos de produção de amônia e metanol, a primeira etapa consiste na determinação de um perfil de matéria-prima utilizada no parque global de craqueamento a vapor. A Tabela 16 apresenta um perfil atual destas matérias-primas (GELDER, 2023).

Tabela 16 – Participação das Matérias-Primas fósseis no parque global de craqueamento a vapor (GELDER, 2023)

Matéria-Prima	Participação [% em massa]
Etano	39
GLP	17
Nafta	35
Gasóleo	5
Outros	4

Para efeitos de modelagem, foi considerado que as correntes de Etano e GLP seriam completamente derivadas da produção de gás natural. Nafta e Gasóleo compõem a contribuição de derivados de Petróleo.

Outras matérias-primas incluem graxas, gás de refinaria, líquido de gás natural, querosene e resíduos de refino. A partir de uma pesquisa sobre o parque global de craqueamento a vapor, foram levantadas as matérias-primas alternativas utilizadas e, daí, realizada uma

distribuição por similaridade com as demais (KOOTTUNGAL, 2015). Esta distribuição é necessária para atribuição de um perfil de produtividade para esta carga.

Tabela 17 – Perfil de similaridade das outras matérias-primas aplicado na modelagem (KOOTTUNGAL, 2015)

Matéria-Prima	Participação [% em massa]
Similar a Etano	8
Similar a GLP	31
Similar a Nafta	31
Similar a Gasóleo	30

O rendimento de cada produto por tipo de carga é apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Rendimento das diferentes cargas de alimentação de Craqueadores a Vapor (AKAH; AL-GHRAMI, 2015)

Rendimento as cargas de Craqueamento a Vapor [% em massa]					
	Etano	GLP	Nafta	Gasóleo	Outros
Etileno	80%	41%	30%	25%	36%
Propileno	2%	17%	13%	14%	14%
C4s	3%	6%	13%	11%	9%
BTX	0%	0%	9%	8%	5%
<i>Hidrogênio+Metano</i>	13%	26%	26%	17%	22%
<i>C5+</i>	2%	11%	8%	7%	8%
<i>Óleo Combustível</i>	0%	0%	1%	18%	6%
<i>Outros</i>	15%	37%	35%	42%	36%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%

Finalmente, combinando as informações da Tabela 16 e Tabela 18, podem ser obtidas as participações de cada matéria-prima na produção de cada um dos HVCs, como apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 – Participação de cargas na produção de HVCs (Elaboração própria)

Participação das cargas por HVC [% em massa]					
	Etano	GLP	Nafta	Gasóleo	Outros
Etileno	61%	13%	20%	2%	3%
Propileno	8%	29%	49%	8%	6%
C4s	16%	12%	60%	7%	5%
BTX	0%	0%	83%	11%	6%

Com base nestas participações, e nos rendimentos específicos, é possível obter a demanda de cada uma das cargas para a produção de HVCs através da equação [7].

$$m_c = \frac{p_{c,j} \times m_j}{\eta_{j,c}} \quad [7]$$

onde,

m_c – Demanda anual da carga c [Mt de carga c/ano];

$p_{c,j}$ – participação da carga c na produção o composto j [%];

m_j – Demanda anual do composto j [Mt composto j/ano];

$\eta_{j,c}$ – rendimento do produto j dada a carga c [%];

Finalmente, as correntes de gás natural e derivados de petróleo são obtidas a partir das equações [8] e [9]:

$$m_g = m_{C2} + m_{GLP} + 0.39m_{OT} \quad [8]$$

$$m_o = m_{nf} + m_{go} + 0.61m_{OT} \quad [9]$$

onde,

m_g – Demanda anual de gás natural para produção de etileno [Mt/ano];

m_{C2} – Demanda anual de etano para produção de etileno [Mt/ano];

m_{GLP} – Demanda anual de GLP para produção de etileno [Mt/ano];

m_{OT} – Demanda anual de outras cargas para produção de etileno [Mt/ano];

m_o – Demanda anual de derivados de petróleo para produção de etileno [Mt/ano];

m_{nf} – Demanda anual de nafta para produção de etileno [Mt/ano];

m_{go} – Demanda anual de gásóleo para produção de etileno [Mt/ano];

Um cálculo análogo ao realizado para o etileno é realizado para os demais HVCs (propileno, C4 e BTX). Considerando o percentual em massa da oferta global destes produtos derivado do processo de craqueamento a vapor (KULPRATHIPANJA et al., 2021), apresentados na Tabela 20, serão realizadas estimativas da defasagem de oferta destes HVCs.

Tabela 20 – Oferta global de Propileno, C4s e BTX derivados do Craqueamento a Vapor (KULPRATHIPANJA et al., 2021)

Participação do Craqueamento a Vapor na oferta global [% em massa]	
Propileno	47%
C4s	18%
BTX	26%

3.5 Saídas do Modelo

Além dos quantitativos em base energética das demandas não-energéticas de matéria-prima fóssil associada ao setor petroquímico, os seguintes resultados podem ser obtidos na forma de gráficos e/ou tabelas a partir do modelo proposto:

- Comparativos das demandas das matérias-primas fósseis com suas respectivas ofertas de energia primária (base energética);

- Percentual da oferta energética primária dedicada a consumo não-energético na cadeia petroquímica;
- Excedentes ou déficits de Propileno, C4s e BTX com relação a oferta de craqueadores a vapor.

3.6 Descrição dos Cenários

As próximas sessões apresentam uma breve descrição dos cenários selecionado, bem como as variáveis *proxy* utilizadas em suas respectivas análises e quaisquer premissas adotadas nas estimativas de demanda.

3.6.1 *Accelerated Renewables: IMP-Ren*

O cenário marcador Ren propõe uma narrativa na qual as políticas climáticas orientadas a limitar o aumento da temperatura média global em 1,5°C levaria a eventual escassez e encarecimento de combustíveis baseados em carbono. Isto se deve a aplicações de precificação de carbono alinhadas à meta do Acordo de Paris, bem como ao progresso tecnológico das tecnologias eólicas e fotovoltaicas. Com o tempo, estas ações tornariam o preço da eletricidade inferior ao dos combustíveis fósseis e, combinado com o desenvolvimento de tecnologias inovadoras, levariam a um aumento significativo da participação da eletricidade nos setores de uso final, como a adoção de veículos elétricos e bombas de calor, atingindo 66% da demanda de energia final em 2050 (LUDERER et al., 2022).

Este cenário apresenta uma restrição ao uso de bioenergia, limitando sua disponibilidade ao máximo de 100EJ/ano. Além disso, existe uma limitação ao sequestro geológico de CO₂, limitando a injeção global a menos de 4GtCO₂.

A Tabela 21 apresenta as variáveis *proxy* selecionadas para a avaliação do cenário.

Tabela 21 – Variáveis *proxy* selecionadas para o IMP-Ren

	Variável	Unidade
Embalagens	PIB/capita	US\$/hab
Construção Civil	Produção de Cimento	Mt/ano
Automotivo	Serviço Energético	10 ⁹ v-km
Eletroeletrônicos	PIB/capita	US\$/hab
Geradores Fotovoltaicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Geradores Eólicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Fibras Sintéticas	PIB/capita	US\$/hab
Fertilizantes Nitrogenados	Uso de Fertilizantes Nitrogenados	Mt N/ano
Aditivos	Energia Final do Setor de Transportes – Líquidos derivados de Petróleo	EJ/ano

Não foram observadas premissas específicas quanto à variação de intensidades materiais ou substituição de matérias-primas, portanto foram utilizados fatores k_t unitários ao longo de todo o período. As projeções foram realizadas considerando a intensidade material do ano base, 2020, e estimativas foram obtidas até o ano 2100 com intervalos de 10 anos.

O cenário foi desenvolvido com o uso do IAM REMIND (*REgional Model of Investment and Development*) acoplado ao módulo MAgPIE (*Model of Agricultural Production and its Impacts on the Environment*), ambos desenvolvidos pelo *Postdam Institute for Climate Impact Research*.

REMIND é um modelo de otimização energo-econômico de equilíbrio geral com escopo global regionalizado contendo um módulo macroeconômico seguindo um modelo de crescimento ótimo tipo Ramsey conectado diretamente a um módulo do sistema

energético através das demandas de energia final e seus custos. O modelo é fracionado em 12 macrorregiões globais, diversas opções de recursos energéticos e mais de 50 tecnologias de conversão entre energia primária e energia final (POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH, acessado em 11/02/2024 a). O modelo e sua documentação estão disponíveis nos seguintes endereços, respectivamente: <https://github.com/remindmodel/remind> e <https://rse.pik-potsdam.de/doc/remind/2.1.0/>.

MAGPIE é um modelo global de alocação de uso de solo de equilíbrio parcial, conectado a um modelo de vegetação dinâmica com resolução de malha de 0,5°x0,5°. O modelo tem como função objetivo a minimização do custo total de produção dadas as demandas regionais por alimento e bioenergia (POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH, acessado em 11/02/2024 b). O modelo e sua documentação estão disponíveis nos seguintes endereços, respectivamente: <https://github.com/magpiemodel/magpie> e <https://rse.pik-potsdam.de/doc/magpie/4.6.0/>.

3.6.2 *Low Energy Demand: IMP-LD*

O cenário marcador LD apresenta uma narrativa de redução da demanda energética através de rápidas mudanças institucionais e sociais, que alteram a forma como os serviços energéticos são fornecidos e consumidos, com grande foco no aumento de eficiência energética nos setores de uso final. Cinco fatores caracterizam e definem a descrição das tecnologias e consumo energético destes cenário: granularidade, isto é, a proliferação de tecnologias de pequena escala e baixo custo unitário, permitindo acesso equitativo; provisionamento de serviços de geração distribuição e uso final de energia descentralizados; valorização do uso dos serviços, em contraste a valorização da posse de produtos, fomentando a economia do compartilhamento; digitalização de serviços

rotineiros; transformação rápida, demandada pelos consumidores finais conforme crescimento das receitas e aspirações por qualidade de vida (GRUBLER et al., 2018).

A Tabela 22 apresenta as variáveis *proxy* selecionadas para a avaliação do cenário.

Tabela 22 – Variáveis *proxy* selecionadas para o IMP-LD

	Variável	Unidade
Embalagens	PIB/capita	US\$/hab
Construção Civil	Área Construída	m ² /ano
Automotivo	Serviço Energético	10 ⁹ p-km
Eletroeletrônicos	PIB/capita	US\$/hab
Geradores Fotovoltaicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Geradores Eólicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Fibras Sintéticas	PIB/capita	US\$/hab
Fertilizantes Nitrogenados	Produção Agrícola	Mt/ano
Aditivos	Energia Final do Setor de Transportes – Líquidos derivados de Petróleo	EJ/ano

Este cenário apresenta premissas bem específicas para eficiência material e desmaterialização. Para o setor de embalagens, é proposto que (GRUBLER et al., 2018):

“Thus, by 2050 LED returns to a comparable form of retail organization as was prevalent before the introduction of once-through throwaway packaging 100 years earlier.”

Portanto, para efeitos de modelagem, foi considerada a eliminação completa do uso de embalagens plásticas descartáveis. Não foi considerada a adoção de embalagens

reutilizáveis, e sim a substituição do plástico por materiais alternativos, como vidro ou papel/madeira.

Para o setor de construção civil, não há uma menção direta a intensidade do uso de plásticos. Entretanto, é mencionada a redução de 20%, em 2050, da demanda material de cimento em decorrência da extensão do tempo de vida e reuso de edificações. Este mesmo fator foi aplicado para o consumo de termoplásticos deste setor de uso final.

Para o setor automotivo foi considerada a redução de 50% da frota de veículos em 2050 para suprir a demanda de passageiros.km projetada no cenário, para eletroeletrônicos foi aplicado o fator de desmaterialização de 32% em 2050 proposto no artigo para os plásticos em geral e para outros produtos do setor petroquímico 25%. De forma conservadora, não foram implementados fatores de desmaterialização para fertilizantes nitrogenados ($k_t = 1 \forall t$). A Tabela 23 apresenta os fatores de desmaterialização k_{2050} aplicados para as estimativas de demanda

Tabela 23 – Fatores k_{2050} IMP-LD

	k_{2050}
Embalagens	0
Construção Civil	0.80
Automotivo	0.50
Eletroeletrônicos	0.68
Outros	0.25
Fertilizantes Nitrogenados	1

As projeções foram realizadas considerando a intensidade material do ano base, 2020, e estimativas foram obtidas até o ano 2050 com intervalos de 10 anos.

O cenário foi desenvolvido com o uso do IAM MESSAGEix (*Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact*) acoplado ao módulo

GLOBIOM (*GL*lobal *BIO*sphere *M*anagement), desenvolvidos pela IIASA (*I*nternational *I*nstitute for *A*ppplied *S*ystems *A*nalysis).

MESSAGEix é um modelo de otimização de equilíbrio parcial do sistema energético com escopo global regionalizado. A modelagem macroeconômica é feita através de sua interação com o modelo MACRO (*MACRO*-economy). O modelo é fracionado em 11 macrorregiões globais, com diversas opções de recursos energéticos e de tecnologias de conversão entre energia primária e energia final. GLOBIOM é o modelo de equilíbrio parcial com escopo global de alocação de uso de solo que faz parte da estrutura do IAM da IIASA (HUPPMANN et al., 2019). O modelo e sua documentação estão disponíveis no seguinte endereço: <https://docs.messageix.org/projects/global/en/latest/>.

3.6.3 *Emphasis on Net Negative Emissions:*

IMP-Neg

O cenário marcador Neg propõe uma trajetória de emissões que acarreta um *overshoot* limitado de temperatura ao longo do século, porém alcançando a meta de aquecimento de 1,5°C no fim do século. A narrativa do cenário se pautava em uma grande inserção de técnicas e tecnologias que permitam que altos índices de emissão negativa compensem as emissões remanescentes na economia nos setores de difícil abatimento, com destaque para os BECCS (RIahi et al., 2021).

A Tabela 24 apresenta as variáveis *proxy* selecionadas para a avaliação do cenário.

Tabela 24 – Variáveis *proxy* selecionadas para o IMP-Neg

	Variável	Unidade
Embalagens	PIB/capita	US\$/hab
Construção Civil	Produção de Cimento	Mt/ano
Automotivo	Serviço Energético	10 ⁹ p-km
Eletroeletrônicos	PIB/capita	US\$/hab
Geradores Fotovoltaicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Geradores Eólicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Fibras Sintéticas	PIB/capita	US\$/hab
Fertilizantes Nitrogenados	População	10 ⁶ hab
Aditivos	Energia Final do Setor de Transportes – Líquidos derivados de Petróleo	EJ/ano

Este cenário apresenta a introdução de biomateriais em substituição a materiais de origem fóssil, com a evolução da participação no total de uso não-energético de acordo com a Tabela 25.

Tabela 25 – Participação da Biomassa na demanda não-energética

	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
% Biomassa para fins não-energéticos	6%	13%	15%	13%	23%	33%	37%	46%	51%
Fatores k_t	0.94	0.87	0.85	0.87	0.77	0.67	0.63	0.54	0.49

As projeções foram realizadas considerando a intensidade material do ano base, 2020, e estimativas foram obtidas até o ano 2100 com intervalos de 10 anos.

O cenário foi desenvolvido com o uso do IAM COFFE (*C*omputable *F*ramework *F*or *E*nergy and the *E*nvironment model), desenvolvido pelo laboratório CENERGIA da COPPE/UFRJ.

COFFEE é um modelo de otimização de equilíbrio parcial do sistema energético e uso de solo com escopo global. A modelagem macroeconômica é feita através de sua interação com o modelo TEA (*T*otal *E*conomy *A*ssessment). O modelo é fracionado em 18 macrorregiões globais, diversas opções de recursos energéticos e mais de 100 tecnologias de conversão entre energia primária e energia final. Ao contrário dos modelos anteriores, o COFFEE possui um módulo interno de mudança de uso de solo completamente integrado ao modelo do sistema energético. A descrição do modelo pode ser encontrada em ROCHEDO, 2016

3.6.4 *Focus on Shifting Development Pathways:*

IMP-SP

Este cenário defende que apesar de políticas climáticas ambiciosas, associadas a desenvolvimento econômico, educação, progresso tecnológico e estilos de vida menos intensivos em recursos naturais serem elementos essenciais para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (ODSs), ainda assim não são suficientes. Desta forma, propostas adicionais de desenvolvimento sustentável são sugeridas e analisadas, incluindo medidas de financiamento climático, redistribuição progressiva das receitas de precificação de carbono, nutrição saudável e suficiente e melhoria do acesso a energias modernas. Estas medidas seriam suficientes para fechar os gaps de cumprimento das ODSs e a meta de 1,5°C do Acordo de Paris (SOERGEL et al., 2021). Este cenário se destaca dos demais, do ponto de vista metodológico, por seguir

uma trajetória socioeconômica compartilhada SSP1, traçando um caminho de desenvolvimento mais sustentável, enquanto os demais cenários seguem a trajetória SSP2, correspondente a um cenário mais próximo do *business-as-usual* (O'NEILL et al., 2017).

A Tabela 26 apresenta as variáveis *proxy* selecionadas para a avaliação do cenário.

Tabela 26 – Variáveis *proxy* selecionadas para o IMP-SP

	Variável	Unidade
Embalagens	PIB/capita	US\$/hab
Construção Civil	Área Construída	m ² /ano
Automotivo	Serviço Energético	10 ⁹ p-km
Eletroeletrônicos	PIB/capita	US\$/hab
Geradores Fotovoltaicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Geradores Eólicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Fibras Sintéticas	PIB/capita	US\$/hab
Fertilizantes Nitrogenados	Uso de Fertilizantes Nitrogenados	Mt N/ano
Aditivos	Energia Final do Setor de Transportes – Líquidos derivados de Petróleo	EJ/ano

O artigo que descreve este cenário menciona em diversas passagens a redução da intensidade de uso de materiais e o uso de biomassa como matéria-prima de materiais. Apesar das menções e da coerência dessas tendências com a narrativa do cenário, não são fornecidos dados que permitam mensurar os impactos destas medidas na redução da demanda de matéria-prima fóssil. Portanto, neste estudo de caso, não serão considerados fatores de modificação das demandas ($k_t = 1 \forall t$). As projeções foram realizadas

considerando a intensidade material do ano base, 2020, e estimativas foram obtidas até o ano 2100 com intervalos de 10 anos.

O cenário foi desenvolvido com o uso do IAM IMAGE (*Integrated Model to Assess the Global Environment*), desenvolvido pelo PBL (*Planbureau voor de Leefomgeving*), a Agência de Planejamento Ambiental Holandesa.

IMAGE é um modelo de simulação de equilíbrio parcial, contendo módulos integrados para o sistema energético e mudanças de uso do solo. Os indicadores macroeconômicos são imputados de forma exógena e, ao contrário dos demais modelos abordados, que possuem uma abordagem de “predição perfeita”, isto é, calculam um resultado ótimo para todo o horizonte temporal simultaneamente, por se tratar de um simulador, o IMAGE resolve o horizonte temporal para cada passo de tempo, utilizando os resultados do ano anterior como entrada para a simulação do ano seguinte (PBL NETHERLAND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AGENCY, 2021). A documentação do modelo pode ser encontrada no endereço:

https://models.pbl.nl/image/index.php/Welcome_to_IMAGE_3.2_Documentation#

3.6.5 *Gradual Strengthening: IMP-GS*

Finalmente, o cenário IMP-GS propõe uma trajetória gradual, em princípio tomando como base boas práticas de mitigação com eficiência comprovada sendo adotadas em larga escala até 2030, seguido de uma intensificação das medidas e adoção de precificação de carbono para alcançar a meta de 2°C ao fim do século. A análise sugere que uma adoção precoce de medidas climáticas baseadas em boas práticas é menos custoso do que qualquer atraso na cooperação climática global (VAN SOEST et al., 2021).

A Tabela 27 apresenta as variáveis *proxy* selecionadas para a avaliação do cenário.

Tabela 27 – Variáveis *proxy* selecionadas para o IMP-GS

	Variável	Unidade
Embalagens	PIB/capita	US\$/hab
Construção Civil	Energia Final do setor Residencial e Comercial	EJ/ano
Automotivo	Serviço Energético	10 ⁹ p-km
Eletroeletrônicos	PIB/capita	US\$/hab
Geradores Fotovoltaicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Geradores Eólicos	Capacidade Adicionada	GW/ano
Fibras Sintéticas	PIB/capita	US\$/hab
Fertilizantes Nitrogenados	Produção Agrícola	Mt/ano
Aditivos	Energia Final do Setor de Transportes – Líquidos derivados de Petróleo	EJ/ano

Este cenário não apresenta premissas ligadas a variação da intensidade do consumo ao longo do tempo, portanto não serão considerados fatores de modificação das demandas ($k_t = 1 \forall t$). As projeções foram realizadas considerando a intensidade material do ano base, 2020, e estimativas foram obtidas até o ano 2100 com intervalos de 10 anos.

O cenário foi desenvolvido com o uso do IAM WITCH (*World Induced Technical Change Hybrid*), desenvolvido pelo RFF-CMCC-EIEE (*European Institute on Economics and the Environment*).

WITCH é um modelo de otimização de equilíbrio geral do sistema econômico diretamente acoplado a um módulo do sistema energético com escopo global regionalizado em 17 macrorregiões globais, diversas opções de recursos energéticos e de tecnologias de conversão entre energia primária e energia final. A modelagem de uso de

solo é realizada através de uma conexão externa com o GLOBIOM, já abordado anteriormente (RFF-CMCC EUROPEAN INSTITUTE ON ECONOMICS AND THE ENVIRONMENT (EIEE), acessado em 11/02/2024). O modelo e sua documentação podem ser encontrados no endereço: <https://www.witchmodel.org/>

A tabela 28 apresenta um resumo das principais características dos cenários apresentados.

Tabela 28 – Variáveis proxy selecionadas para o IMP-GS

Cenário	Narrativa	Aumento de Temperatura em 2100 [°C]	Horizonte Temporal dos dados disponíveis	Estratégia de redução da demanda material	IAM
IMP-Ren	Alta adoção de tecnologias renováveis no setor energético e eletrificação dos serviços.	1,5	2100	Não explicitado	REMIND-MAgPIE
IMP-LD	Medidas de redução da demanda, através de melhorias na eficiência energética e mudanças comportamentais.	1,5	2050	Redução da demanda através de medidas de eficiência material	MESSAGEix-GLOBIOM
IMP-Neg	Adoção em larga escala de técnicas de remoção de carbono da atmosfera, em especial com o uso de BECCS, possibilitando a contabilização de “emissões negativas”.	1,5 (com overshoot)	2100	Substituição de matéria-prima fóssil por biomassa	COFFEE
IMP-SP	Caminho de desenvolvimento sustentável, com grandes mudanças comportamentais e de conjuntura política, impactando grandes indicadores de desenvolvimento, como crescimento populacional menos acelerado e aumento do PIB/capita.	1,5	2100	Não explicitado	IMAGE

Cenário	Narrativa	Aumento de Temperatura em 2100 [°C]	Horizonte Temporal dos dados disponíveis	Estratégia de redução da demanda material	IAM
IMP-GS	Adoção de medidas comprovadamente eficazes contra as mudanças climáticas no curto prazo, mesmo que sub-ótimas, com a adoção de medidas mais intensas no longo prazo.	2,0	2100	Não explicitado	WITCH-GLOBIOM

4 Resultados e Discussão

A seção 4.1 apresenta os resultados da aplicação do modelo proposto, descrito no capítulo 3, aos cenários selecionados, apresentados na seção 3.6. A seção 4.2 expande a discussão a partir dos resultados obtidos, incluindo uma discussão sobre a implementação de modelos mais detalhados do setor petroquímico em IAMs.

4.1 Resultados

As seções a seguir apresentam as projeções das demandas materiais setoriais obtidas a partir das correlações com as variáveis *proxy* extraídas da base de dados do AR6 (BYERS et al., 2022), bem com as demandas de matéria-prima fóssil estimada para cada um dos cenários analisados.

4.1.1 IMP-Ren

A **Figura 10** apresenta as projeções das demandas materiais setoriais resultantes das correlações com as variáveis *proxy*. A série TP Renováveis corresponde a demanda de termoplásticos associada aos incrementos anuais de conversores eólicos e solares.

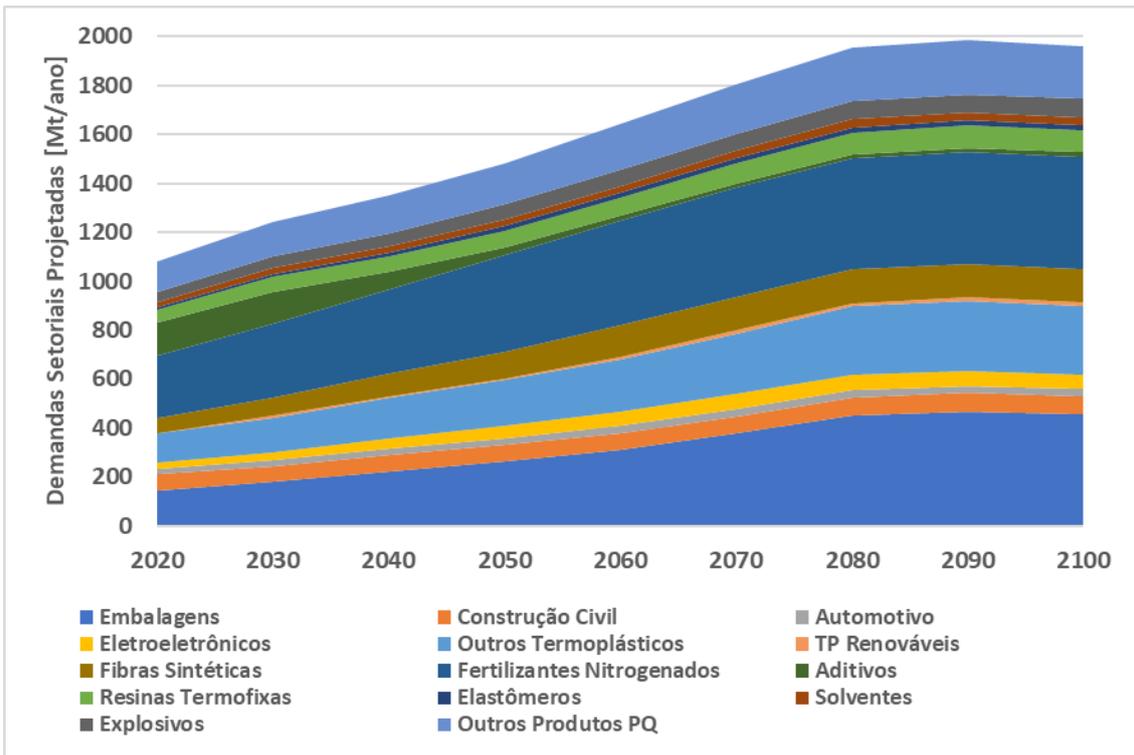


Figura 10 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

A Figura 11 apresenta os resultados de demanda de gás natural para uso não-energético na cadeia petroquímica para o cenário IMP-Ren, enquanto a Figura 12 apresenta resultado análogo para derivados de petróleo.

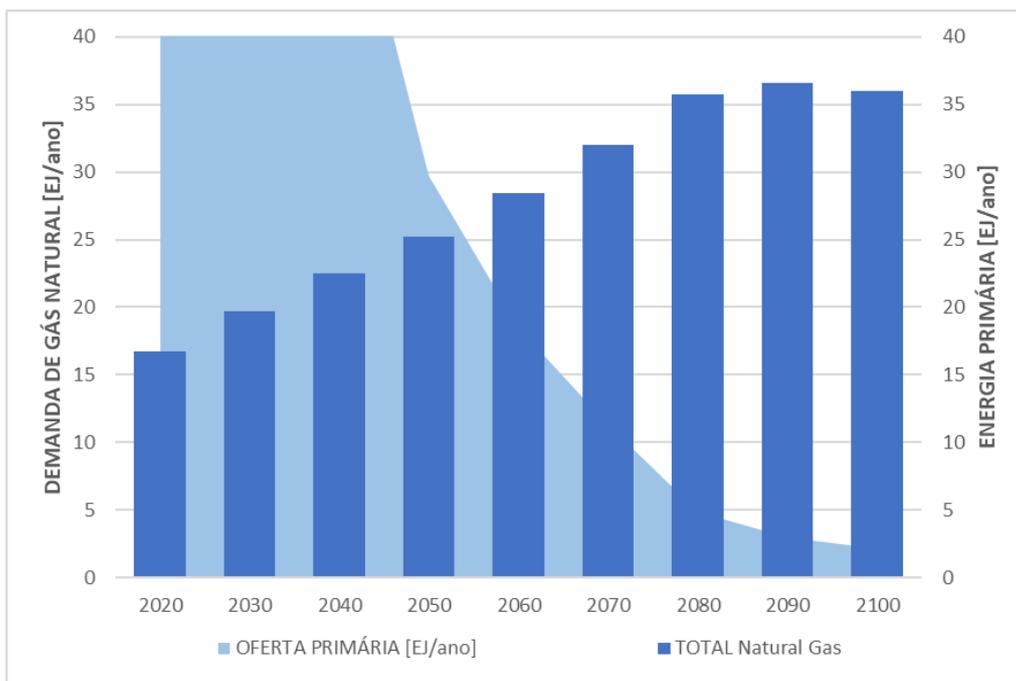


Figura 11 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

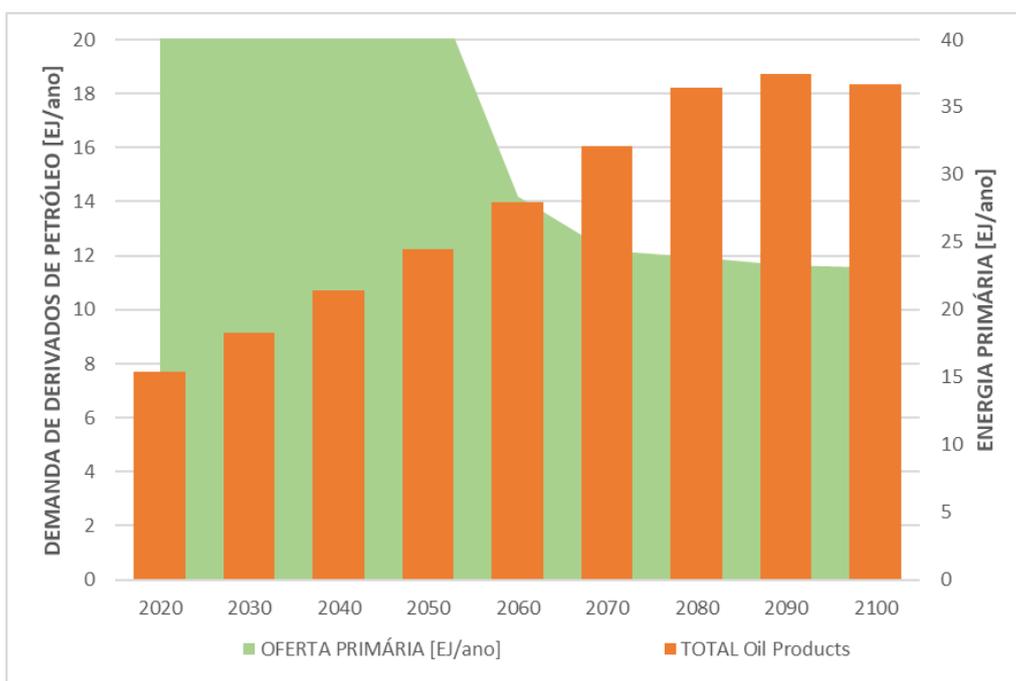


Figura 12 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

Como pode ser observado, para este cenário, o modelo proposto aponta uma insuficiência da demanda de gás natural já a partir de 2060. Para os derivados de petróleo, apesar de a demanda não superar os valores da oferta, a participação dos insumos petroquímicos atinge valores acima dos 21% a partir de 2050. As implicações desta participação sobre a oferta serão discutidas mais profundamente na seção 4.2.1.

Um resultado interessante de se observar para este cenário é a participação da demanda de termoplásticos para aplicação em geradores de energia renovável e veículos elétricos, uma vez que este IMP representa uma narrativa de alta demanda energética com grande inserção destas tecnologias. A Figura 13 apresenta a demanda de gás natural direcionada para estes fins enquanto a Figura 14 apresenta resultado análogo para derivados de petróleo.

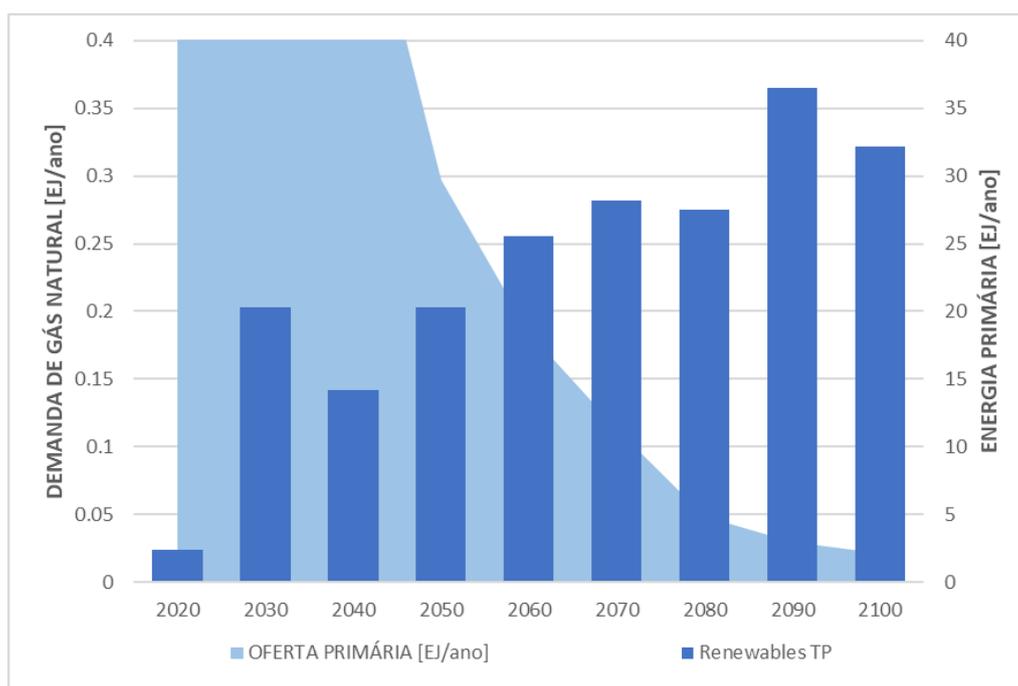


Figura 13 – Demanda não-energética de gás natural para termoplásticos utilizados na produção de geradores eólicos, fotovoltaicos e veículos elétricos – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

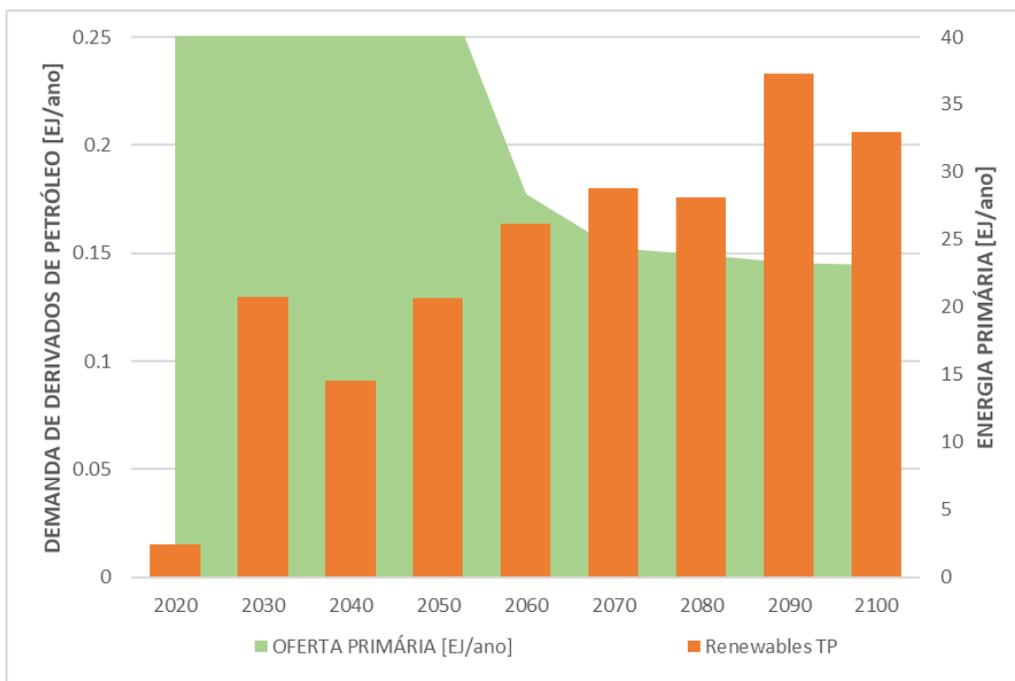


Figura 14 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para termoplásticos utilizados na produção de geradores eólicos, fotovoltaicos e veículos elétricos – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

As demandas direcionadas a estes usos atingem um pico em 2090, de acordo com a modelagem, representando aproximadamente 1% da demanda não-energética total dos respectivos energéticos. Estes resultados indicam que mesmo em cenários de inserção massiva de tecnologias relacionadas a energias renováveis e alta eletrificação do transporte, as demandas materiais associadas a estas mudanças não representariam um grande impacto frente as demandas associadas às demais aplicações.

4.1.2 IMP-LD

A **Figura 15** apresenta as projeções das demandas materiais setoriais resultantes das correlações com as variáveis *proxy*.

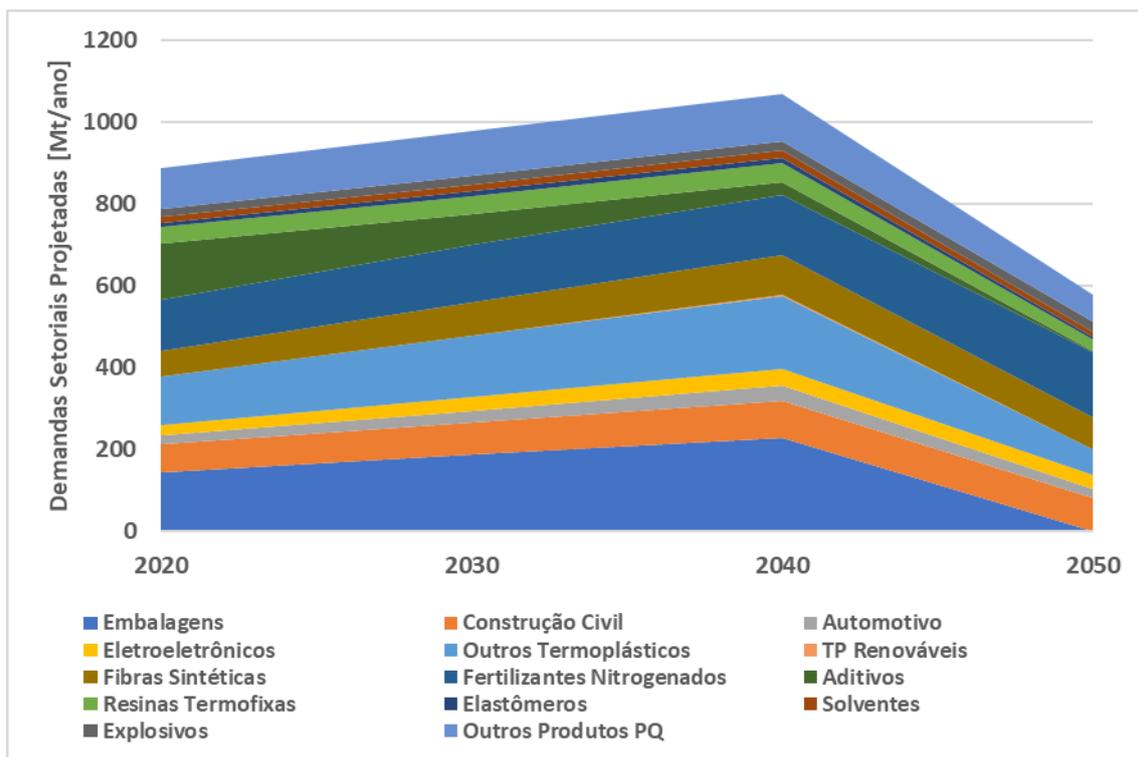


Figura 15 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

A Figura 16 apresenta os resultados de demanda de gás natural para uso não-energético na cadeia petroquímica para o cenário IMP-LD, enquanto a Figura 17 apresenta resultado análogo para derivados de petróleo.

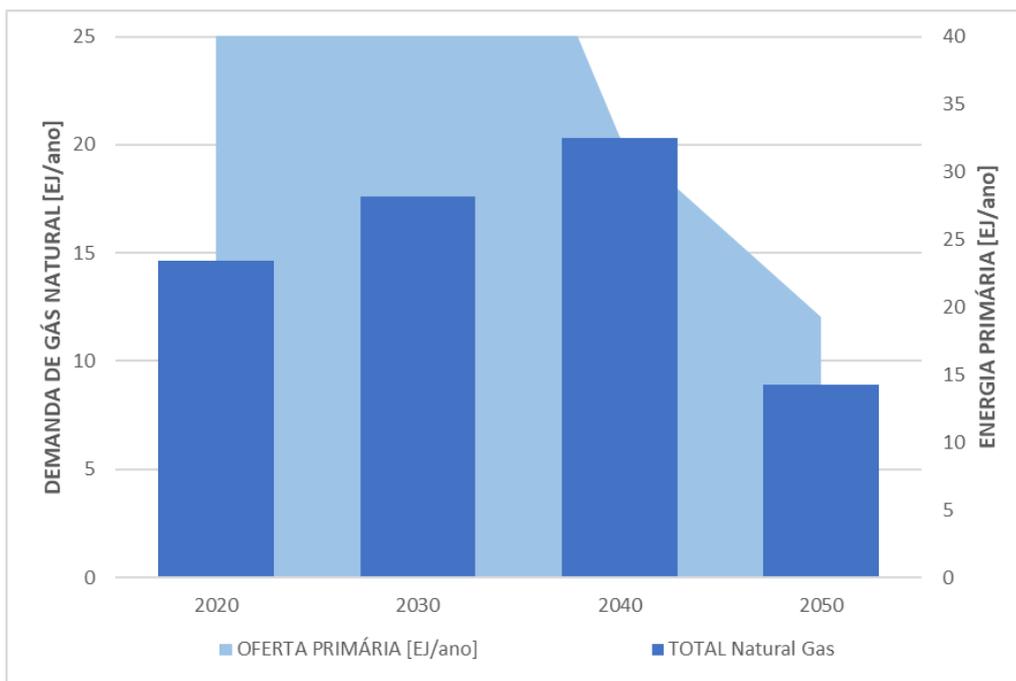


Figura 16 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

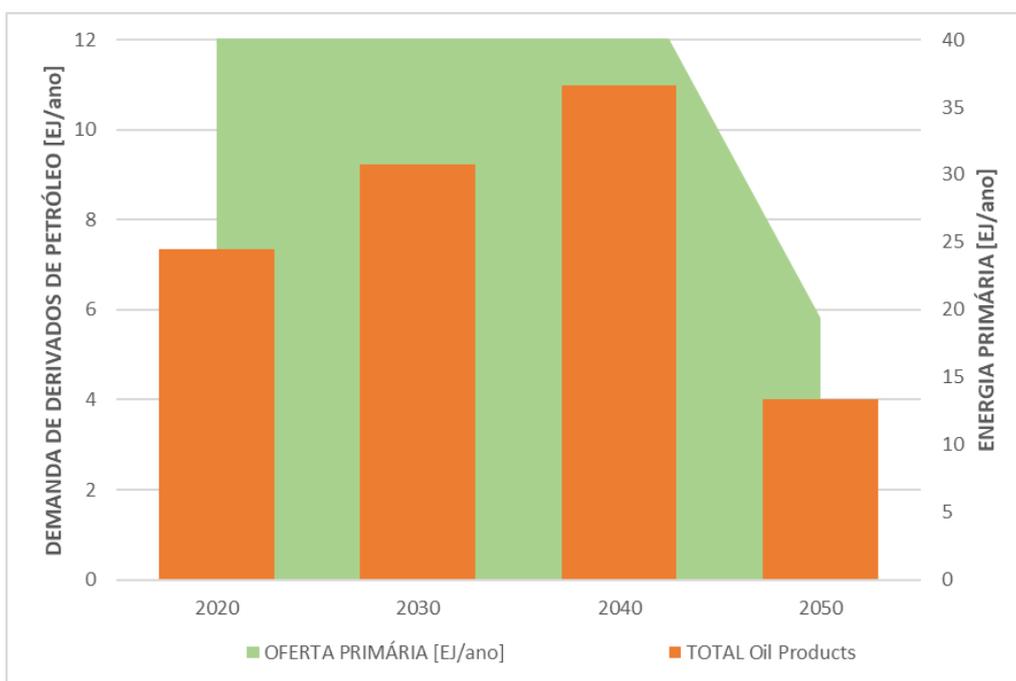


Figura 17 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

Ao contrário dos demais cenários, o IMP-LD apresenta projeções de suas variáveis de saída apenas até o horizonte de 2050. Ainda assim, mesmo com as ações de redução de demanda propostas, pode ser observado o início de uma restrição em 2040, que é aliviada na década seguinte com a implementação das medidas de eficiência material propostas na descrição do cenário.

Vale destacar que este cenário é um dos mais restritivos quanto a oferta de energia primária fóssil no longo prazo, atingindo valores de 1,79 EJ/ano e 0,03 EJ/ano para gás natural e petróleo em 2100 (BYERS et al., 2022). Uma projeção das variáveis *proxy* para além de 2050, teria grandes chances de implicar em participações da demanda não-energética superando os 100% da oferta ao fim do período.

4.1.3 IMP-Neg

A **Figura 18** apresenta as projeções das demandas materiais setoriais resultantes das correlações com as variáveis *proxy*.

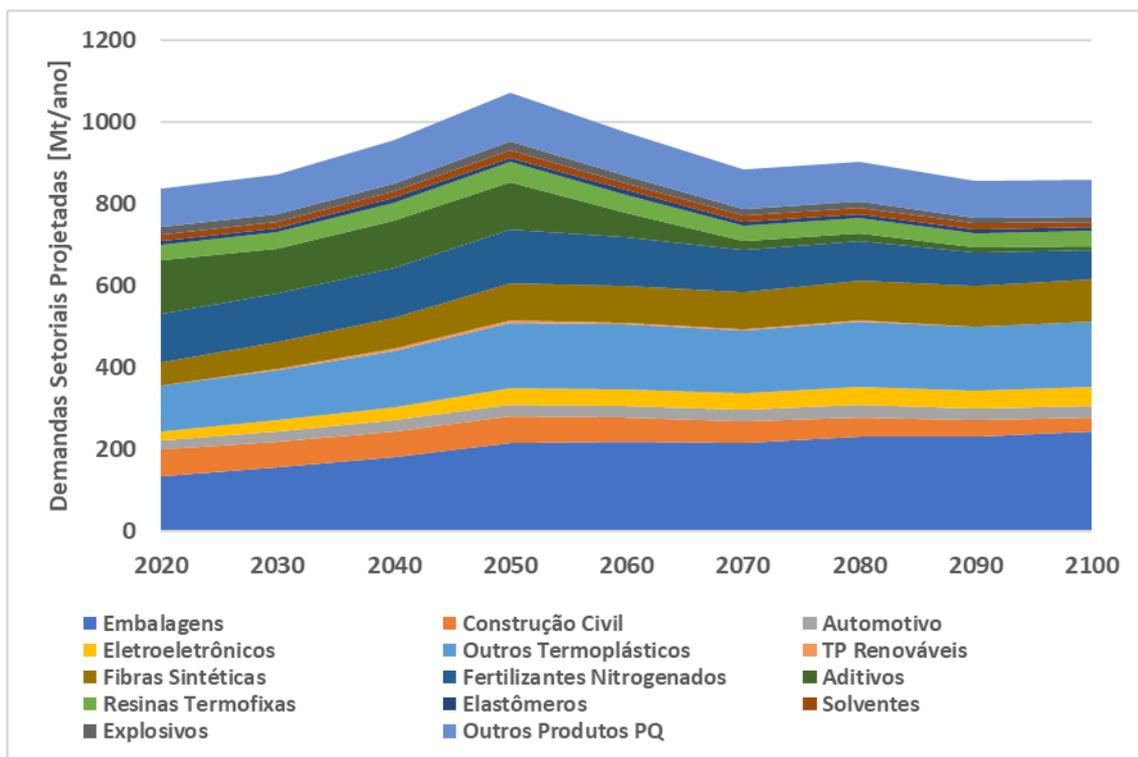


Figura 18 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

A Figura 19 apresenta os resultados de demanda de gás natural para uso não-energético na cadeia petroquímica para o cenário IMP-Neg, enquanto a Figura 20 apresenta resultado análogo para derivados de petróleo.

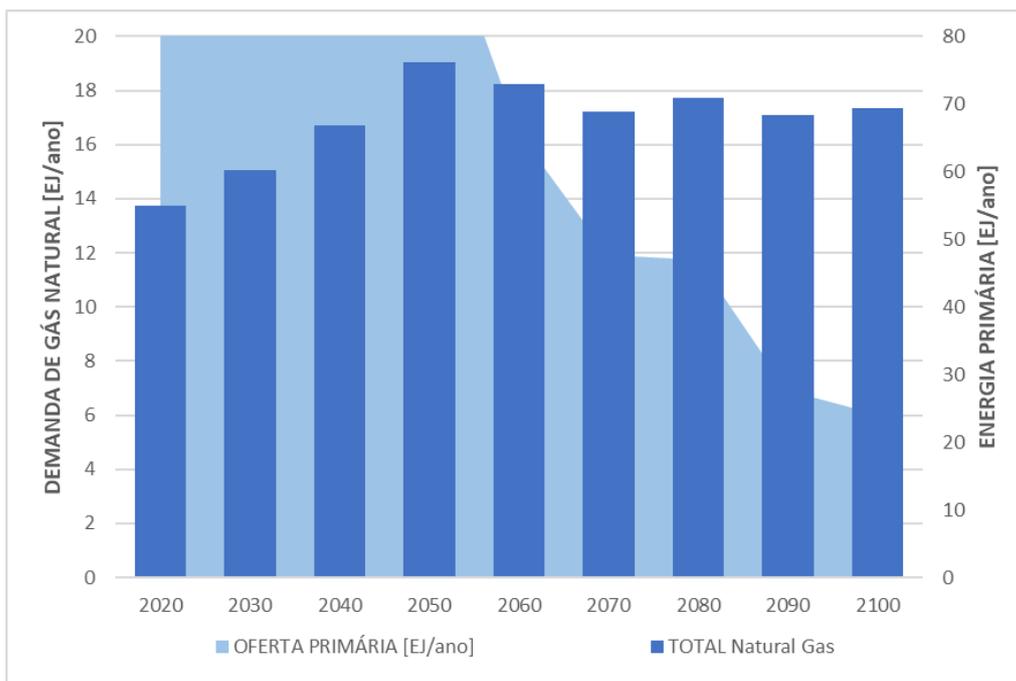


Figura 19 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico – IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

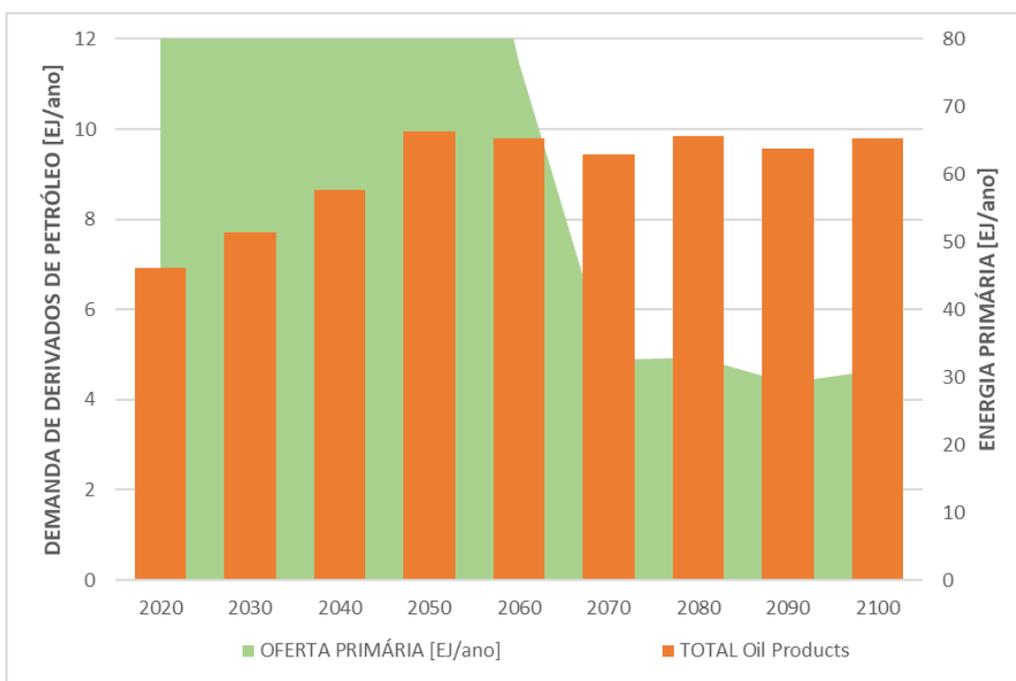


Figura 20 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico – IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

Dos cenários observados, o IMP-Neg é o que apresenta menos restrições para atendimento das demandas não-energéticas do setor petroquímico frente a oferta de matéria-prima. Duas características deste cenário contribuem para este resultado. Em primeiro lugar, o foco de mitigação das emissões de GHG com uso de BECCS, permite que o consumo de combustíveis fósseis permaneça em níveis mais elevados, refletindo na alta oferta presente ao fim do período em comparação com os demais cenários. É notável a alta demanda para aditivos e componentes de mistura de combustíveis permanecendo por um período mais longo em comparação aos demais cenários. Mais oferta, permite que uma fração menor deste total seja demandada para fins exclusivos da cadeia petroquímica. Potencializando este efeito, o uso crescente de biomassa como matéria-prima para biomateriais desloca a demanda de fósseis para este fim.

O efeito do deslocamento da demanda de fósseis por biomassa, apesar de reduzir os impactos de emissão de GEEs das fases iniciais do ciclo de vida destes materiais, não atua necessariamente, em especial no caso dos plásticos, sobre a geração de resíduos associada ao seu consumo. Estes impactos seriam reduzidos apenas caso os plásticos produzidos em substituição fossem biodegradáveis ou com incrementos significativos na capacidade de reciclagem global.

4.1.4 IMP-SP

A **Figura 21** apresenta as projeções das demandas materiais setoriais resultantes das correlações com as variáveis *proxy*.

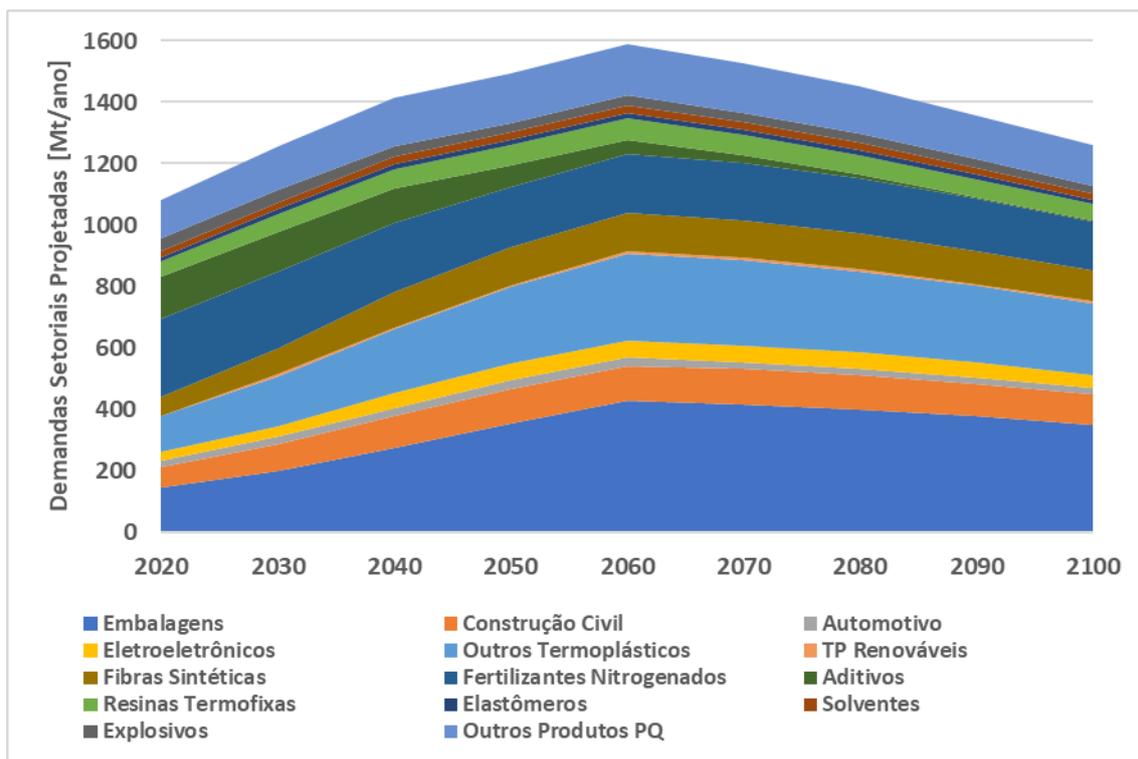


Figura 21 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

A Figura 22 apresenta os resultados de demanda de gás natural para uso não-energético na cadeia petroquímica para o cenário IMP-SP, enquanto a Figura 23 apresenta resultado análogo para derivados de petróleo.

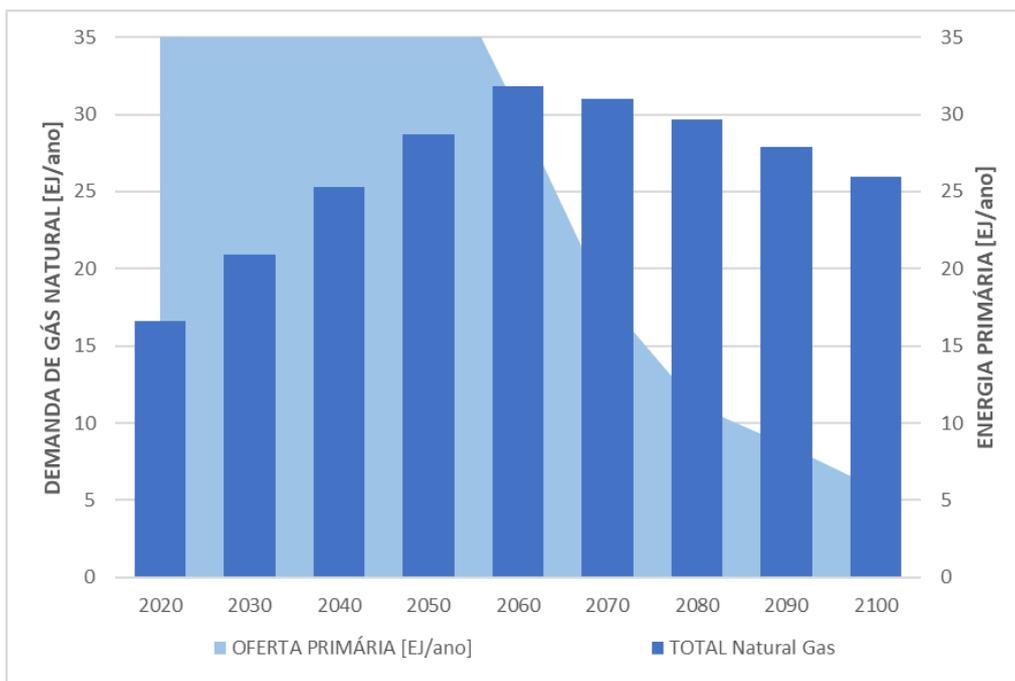


Figura 22 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

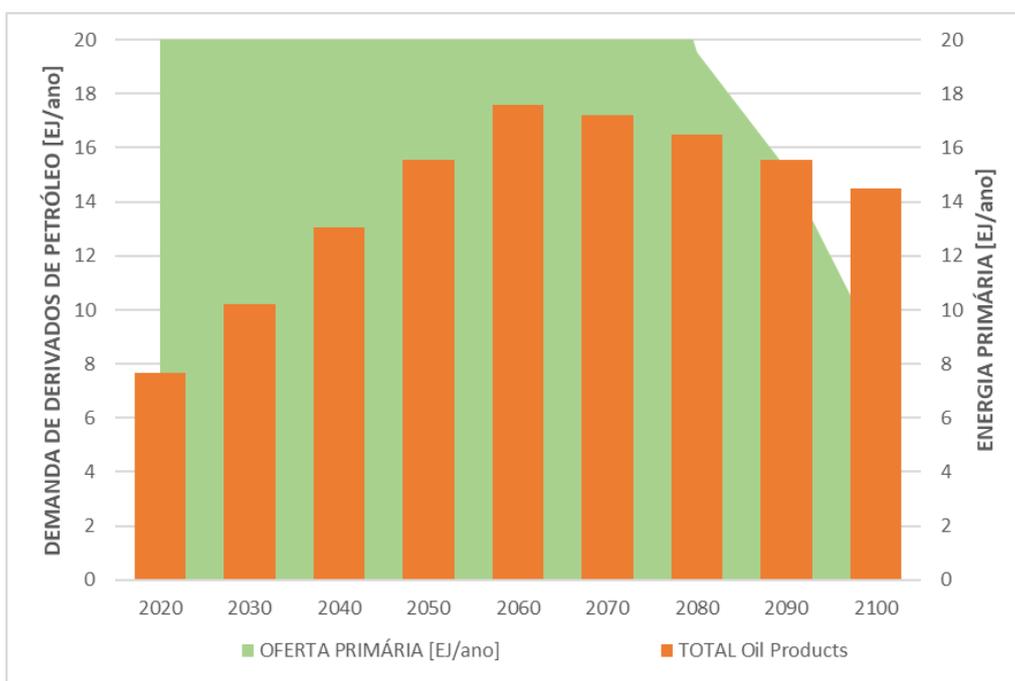


Figura 23 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

Como abordado na descrição do cenário, a narrativa do IMP-SP implica em um aumento de bem-estar e qualidade de vida, e um dos reflexos desta melhoria, é um aumento mais pronunciado do PIB per capita em relação aos demais cenários, como pode ser observado na Tabela 29. Assim, mesmo com a limitação de consumo per capita de plásticos imposta no modelo convergindo a demanda global para níveis de consumo OCDE, estes valores elevados de PIB per capita deslocam positivamente a demanda do cenário.

Tabela 29 – Variação do PIB per capita ao longo do tempo para os cenários analisados [10³ US\$/hab]

	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
IMP-Ren	14.86	18.86	22.97	27.34	32.30	38.94	46.71	55.41	66.20
IMP-LD	14.73	19.19	23.45	27.95	-	-	-	-	-
IMP-Neg	13.64	17.25	20.48	23.65	27.09	30.97	35.37	40.62	46.64
IMP-SP	15.00	20.84	28.70	37.02	45.51	55.23	65.99	77.33	91.05
IMP-GS	13.42	16.83	22.09	26.93	32.08	38.13	45.59	54.45	65.14

Como não foram aplicados fatores de redução de demanda neste cenário, as demandas tanto de gás natural quanto de derivados de petróleo superam as respectivas ofertas de energia primária.

4.1.5 IMP-GS

A **Figura 24** apresenta as projeções das demandas materiais setoriais resultantes das correlações com as variáveis *proxy*.

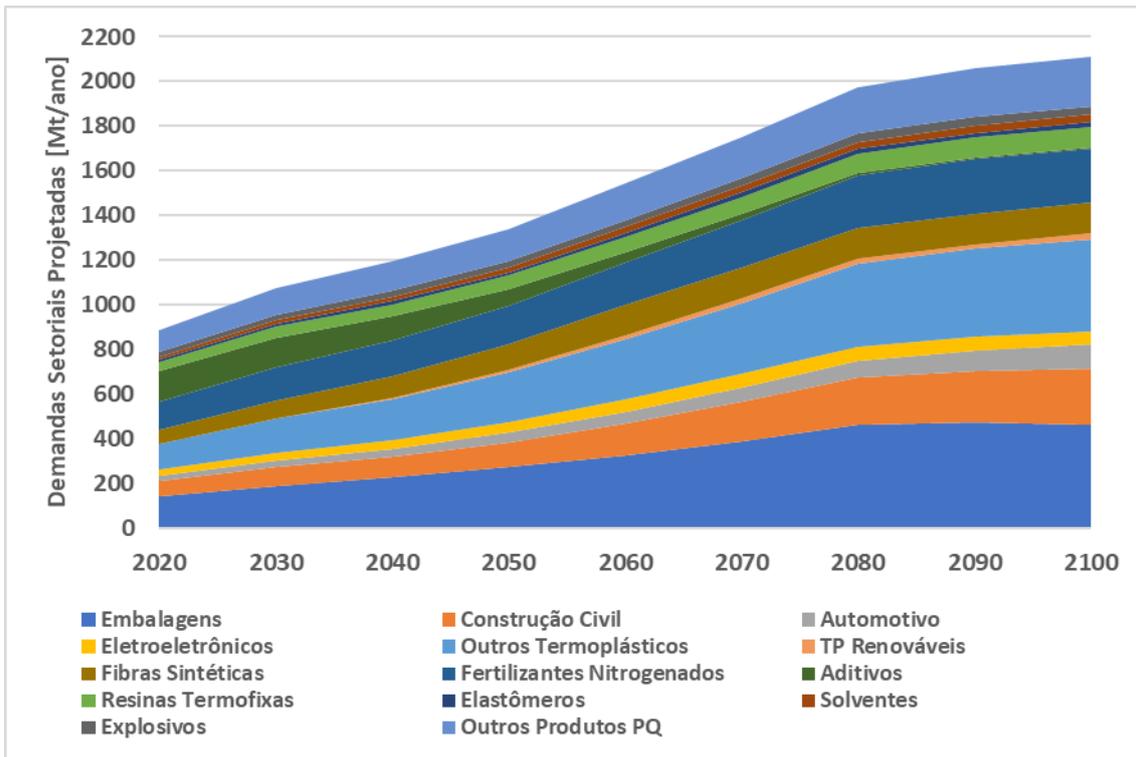


Figura 24 – Demandas materiais projetadas para os setores avaliados – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

Finalmente, para o cenário IMP-GS, a Figura 25 apresenta os resultados de demanda de gás natural para uso não-energético na cadeia petroquímica, enquanto a Figura 26 apresenta resultado análogo para derivados de petróleo.

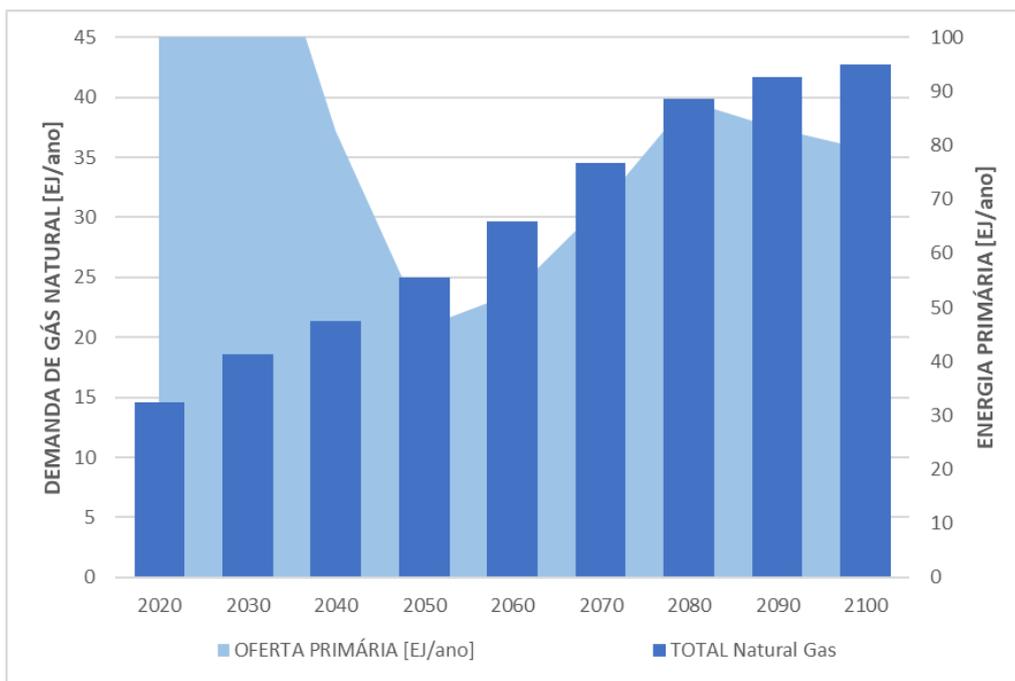


Figura 25 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

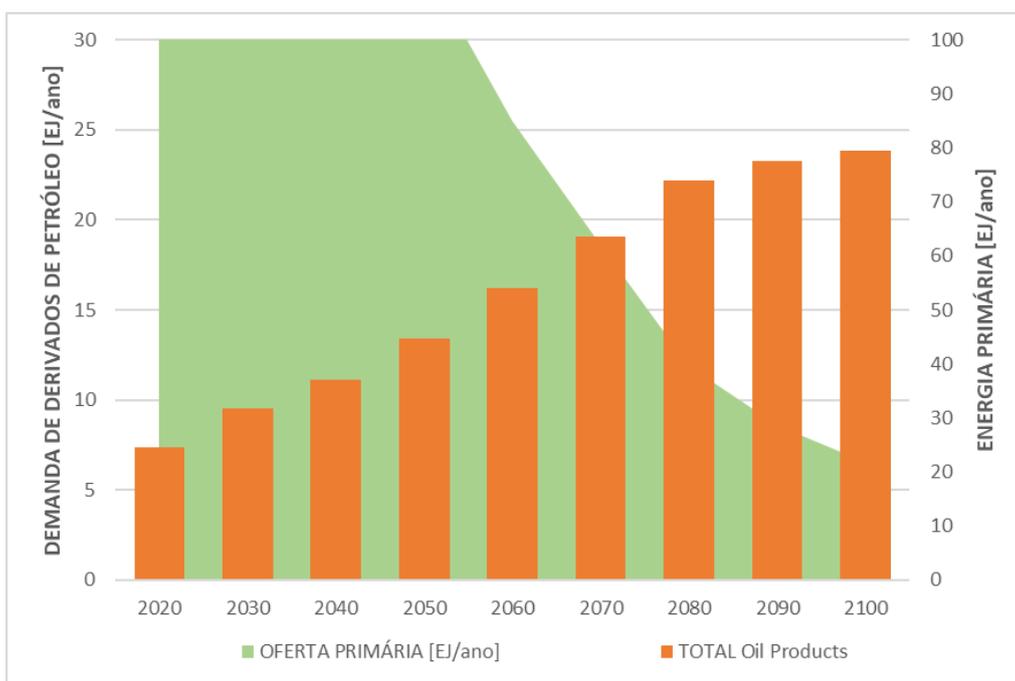


Figura 26 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

Este cenário apresenta o maior nível de oferta de gás natural ao fim do período analisado (79 EJ/ano), o que permite uma folga razoável na participação da demanda não-energética para o setor petroquímico sobre a oferta primária de gás natural. Entretanto, o mesmo não ocorre com relação ao petróleo, com a demanda não-energética por seus derivados superando a oferta primária.

Resultados adicionais para todos os cenários são apresentados no ANEXO II

4.2 Discussão

Os resultados da análise realizada apontam que não é possível atender as demandas materiais projetadas para os setores de uso final nos IMPs do IPCC, sem que sejam realizadas modificações na forma como os produtos petroquímicos são produzidos e/ou consumidos.

Por mais que os cenários ilustrativos não se proponham a apresentar previsões sobre o desenvolvimento global, eles são importantes para exercitar e exemplificar os possíveis caminhos que devem ser buscados para que seja possível atingir a meta de aquecimento do acordo de Paris. Os resultados obtidos suscitam discussões sobre vários aspectos, que vão desde as limitações tecnológicas ligadas à conversão das matérias-primas abordadas até as necessidades de um maior detalhamento do setor petroquímico pelos IAMs. As seções seguintes se aprofundam nestes aspectos.

4.2.1 Integração refino-petroquímica e limites de conversão

Devido ao contexto do desenvolvimento das atividades de refino, que tiveram primordialmente a demanda por combustíveis como principal motivadora (ACHARYA et

al., 2022), foram desenvolvidas e aprimoradas técnicas que favorecem a maximização desta classe de produtos, como gasolina, óleos diesel e combustível, querosene de aviação e gás liquefeito de petróleo (GLP), entre outros. Estes combustíveis representam algo em torno de 90% dos produtos do refino global (SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012a). Tipicamente, apenas 6-7% dos produtos correspondem aos insumos para a cadeia petroquímica, como Nafta, correntes olefínicas de eteno, propeno e butenos, e BTX (benzeno, tolueno e xilenos). (IEA, 2018)

A nafta petroquímica (composta por mistura de hidrocarbonetos na faixa C5-C11), principal produto derivado do refino de petróleo usado como insumo para os craqueadores a vapor, pode ser obtida a partir de várias unidades dentro da refinaria, tanto diretamente a partir da destilação atmosférica quanto de unidades de craqueamento térmico, como viscoredução e coqueamento retardado, ou craqueamento catalítico, como unidades de leito fluidizado (FCC) e hidrocraqueamento. Algumas destas unidades também produzem outros subprodutos que são diretamente aproveitados na indústria petroquímica, com destaque para o propileno, mas também produtos da família do C4 e aromáticos.

Uma forma direta de se obter uma proporção maior de matérias-primas para o uso petroquímico seria o processamento de óleos mais leves, com maior grau API, visto que o processamento destes resulta invariavelmente numa fração menor de resíduos pesados. Tipicamente, refinarias projetadas para o tratamento deste tipo de óleo tendem a apresentar menor complexidade a depender do nível de impurezas presentes, uma vez que precisam de menos processos de valorização dos resíduos de destilação frente a empreendimentos projetados para o tratamento de óleos mais pesados, o que tende a se traduzir em menores custos operacionais. No entanto, o óleo usado como insumo para uma unidade de refino não é uma simples questão de escolha, uma vez que toda a refinaria é projetada para tratar um tipo específico de óleo com a finalidade de produzir uma certa

gama de produtos. Em geral o óleo a ser processado é selecionado tendo em vista disponibilidades das fontes próximas e custos adequados para obtenção de frações para realização de blends, quando necessário. A conversão de uma refinaria existente para o tratamento de um óleo diferente daquele para o qual ela foi projetada é um processo extremamente custoso e muitas vezes inviável (ACHARYA et al., 2022). É importante ressaltar que os insumos petroquímicos apresentam margens de lucro negativas em comparação aos produtos principais do refino, uma vez que são coprodutos dos processos principais de produção de gasolina, diesel e querosene. (IEA, 2018)

A principal fonte de insumos para a petroquímica é a unidade de FCC, que pode inclusive ser projetada para atender a maximização de produção de olefinas. Esta unidade usa como insumos as frações de gasóleo pesado e resíduo de destilação à vácuo. A maximização de olefinas, no entanto, requer o uso de condições operacionais mais agressivas que o FCC típico para produção de combustíveis, com temperaturas mais elevadas e razões catalisador/óleo (C/O) até 5 vezes maiores a depender do produto desejado. SZKLO; ULLER; BONFÁ, 2012b mencionam ainda diversas tecnologias que alteram diretamente o *hardware* da unidade para fins de maximização de olefinas, como *Deep Catalytic Cracking* (DCC), PetroFCC da UOP que se utiliza do reciclo de catalisador gasto para aumentar a razão C/O no meio reacional, a MAXOFIN da KBR que introduz um segundo *riser* exclusivo para o craqueamento da nafta e produção de petroquímicos e a *DOWNER* que inverte os sentidos dos fluxos de catalisador e hidrocarbonetos no meio reacional.

Refinarias que apresentam unidades de Hidrocraqueamento apresentam maior versatilidade, podendo maximizar a produção de nafta através da adequação do catalisador. A redução da demanda por combustíveis poderia implicar em uma redução de uso de unidades de alquilação e polimerização, por exemplo, liberando correntes que poderiam ser aproveitadas para a produção de insumos petroquímicos.

Entretanto, por maiores que sejam as melhorias e otimizações implementadas em uma refinaria padrão, a fração de insumos petroquímicos não alcança os 10% do mix final de produtos. Valores superiores são alcançados apenas em plantas que possuem níveis de integração refino-petroquímica. Unidades deste tipo conseguem aproveitar melhor as sinergias entre os produtos do refino, craqueadores a vapor e produção de aromáticos, com correntes sendo recicladas entre as plantas promovendo o rendimento dos diversos produtos desejados. A Figura 27 apresenta um exemplo desta integração.

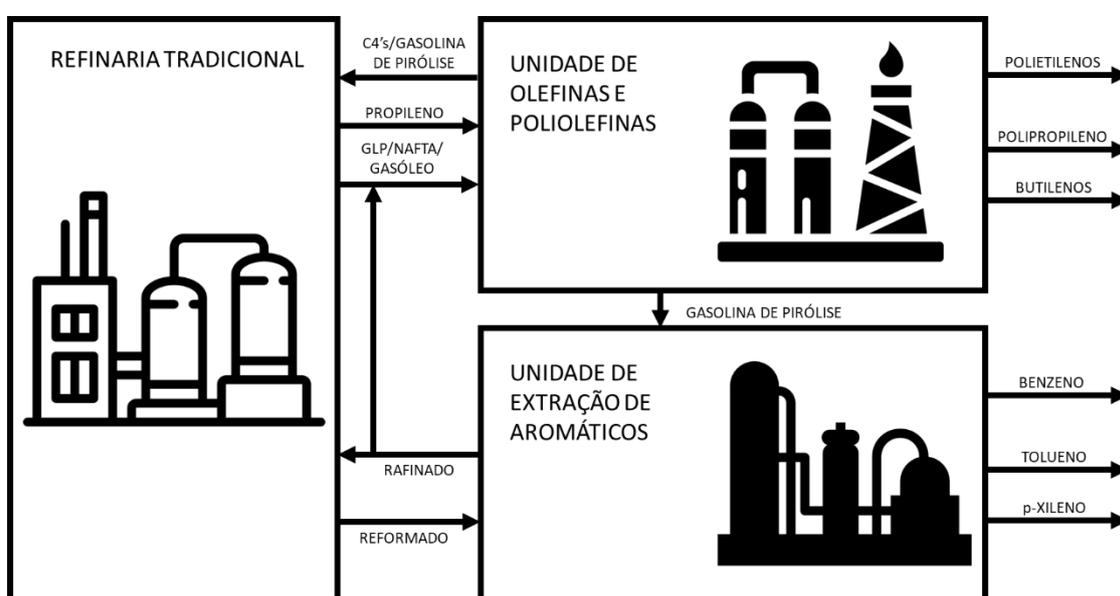


Figura 27 - Exemplo de Integração Refino-Petroquímica
Fonte: Elaboração própria, baseado em (GELDER, 2021)

Além do melhor aproveitamento dos produtos do refino como insumo para o craqueamento a vapor, coprodutos deste processo, como hidrogênio e gasolina de pirólise podem ser aproveitados no processo de refino. Além disto, esse tipo de integração pode fornecer maior flexibilidade na escolha do óleo cru utilizado na refinaria, aumentando a capacidade de adaptação do refino a diferentes condições de mercado. (IEA, 2018)

A consultora Wood Mackenzie classifica as unidades de refino integradas em três gerações. A maior parte das unidades integradas existentes faz parte da primeira geração de empreendimentos, tendo como exemplos de maior integração as refinarias Sinopec China, TOTAL Antwerp e BP Gelsenkirchen. Ainda assim, esta geração de refinarias é capaz de alcançar apenas a faixa de 15-20% de insumos petroquímicos no mix final de produtos (GELDER, 2021). A maior parte destes empreendimentos se encontra na China, onde, inclusive, pode ser observado o fenômeno de “integração reversa”, com empresas do setor petroquímico expandido seu portfólio no sentido do refino. Um efeito sintomático dessa realidade é o fato de que a tradução mais adequada de grandes empreendimentos de refino chineses, sejam eles privados ou estatais, seria para a palavra petroquímica, e não refinaria. (IEA, 2018)

A segunda geração de refinarias integradas, já classificadas como crude oil-to-chemical, conseguem alcançar uma conversão de aproximadamente 40% em petroquímicos. Atualmente, apenas a China possui uma refinaria deste tipo, Hengli & Zhejiang Petrochemical, que tem se destacado no mercado devido aos bons resultados obtidos no período da pandemia de Covid-19, enquanto a maioria das refinarias tradicionais reportava perdas significativas (GELDER, 2021).

A Tabela 30 apresenta a participação das demandas não-energéticas de derivados de petróleo para o setor petroquímicos ao longo do período analisado para os cinco IMPs. O esquema de cores da tabela segue a seguinte classificação:

- **Sem restrição:** Até 7% da oferta global. Esta faixa corresponde à conversão típica de uma refinaria sem integração downstream com a cadeia petroquímica;

- **Integração Refino-Petroquímica:** De 7% a 21% da oferta global. Esta faixa corresponde a níveis de conversão de refinarias existentes que possuem diferentes graus de integração com a cadeia petroquímica;
- **Além da capacidade de integração atual:** De 21% a 100% da oferta global. Esta faixa corresponde à níveis de conversão superiores aos de refinarias atuais com alto grau de integração refino-petroquímica. Seriam necessários avanços estruturais e tecnológicos no parque de refino global para alcançar tais níveis de conversão em larga escala;
- **Oferta Insuficiente:** Acima de 100% da oferta global. Nesta faixa, a demanda não-energética de derivados de petróleo supera a oferta de energia primária projetada pelo cenário. Nestes casos, a demanda estimada só poderá ser suprida com a utilização de matérias-primas alternativas.

Tabela 30 – Participação das demandas não-energéticas de derivados de petróleo sobre a oferta de energia primária para os 5 IMPs

	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
IMP-Ren	4%	5%	10%	27%	49%	65%	76%	80%	79%
IMP-LD	4%	9%	23%	21%	-	-	-	-	-
IMP-Neg	4%	5%	5%	7%	13%	29%	30%	33%	31%
IMP-SP	4%	6%	9%	17%	32%	56%	84%	102%	166%
IMP-GS	4%	5%	7%	12%	19%	31%	56%	81%	109%

A tabela nos mostra que dentro da faixa de conversão equivalente a empreendimentos de segunda geração de acordo com a classificação da Wood MacKenzie, apenas os cenários IMP-LD e o IMP-Neg, teriam suas demandas supridas, caso o parque global de refino se aproximasse deste perfil de unidade.

O IMP-Ren apresenta uma demanda não-energética proporcional a 79% da oferta de energia primária do petróleo projetada para o cenário. Atualmente não existem unidades

com esta capacidade de conversão instaladas, equivalentes à terceira geração, como proposto pela Wood Mackenzie, apesar de existir uma iniciativa da Saudi Aramco em planejamento (GELDER, 2021).

A tecnologia proposta para alcançar este grau de conversão, *Thermal Crude to Chemicals (TC2C)*, vai além da integração refino-petroquímica, partindo para o craqueamento a vapor do óleo cru. Esta rota de conversão dispensa o uso de colunas de destilação atmosférica e a vácuo, contando com etapas de condicionamento do óleo, como minimização de asfaltenos para redução da formação de coque nos reatores. Frações parafínicas mais leves, com alta razão H/C, são separadas com auxílio de vapor superaquecido e direcionadas diretamente para o reator de craqueamento a vapor (SUNDARAM et al., 2023). Frações intermediárias, com moléculas na faixa de 20-35 átomos de carbono passam por hidrocessamento em leito fixo para remoção de heteroátomos bem como hidrogenação de aromáticos, abertura de anéis e hidrocraqueamento, para posterior direcionamento ao reator de craqueamento a vapor. Frações mais pesadas, acima de 35 átomos de carbono, são direcionadas para um reator de circulação líquida, onde são combinadas com o óleo de pirólise resultante do craqueamento a vapor, e os naftênicos são convertidos para frações mais leves que podem ser alimentadas no hidrocessamento das frações intermediárias. O óleo remanescente não convertido é filtrado e direcionado para um reator de leito fixo para remoção de enxofre, resultando em um óleo combustível com baixo teor de enxofre compatível com os padrões da IMO. Esta tecnologia permite a conversão de óleo para químicos básicos na faixa de 70-85%, a depender das características do cru. É importante destacar que a etapa de dessalgação do óleo cru ainda é necessária nessa rota, para proteção dos materiais dos equipamentos, tubulações e acessórios quanto a corrosão dos compostos clorados e danos a catalizadores devido a presença de sódio (SUNDARAM et al., 2024).

Finalmente, restam os cenários IMP-SP e IMP-GS. Estes cenários apresentam demandas não-energéticas de derivados de petróleo superiores aos da oferta de energia primária projetadas para esta fonte. Assim, a única forma de atender esta demanda seria através do uso de matérias-primas alternativas, apresentadas e discutidas na seção 2.5.

Uma avaliação análoga pode ser realizada quanto à restrição de oferta do gás natural, a partir da Tabela 31. Para o gás natural, o esquema de cores da tabela segue a seguinte classificação, baseada no rendimento de etileno para as cargas de nafta e etano em craqueadores a vapor, conforme (AKAH; AL-GHRAMI, 2015):

- **Limite de conversão – Carga de Nafta:** Até 30% da oferta global. Esta faixa corresponde ao rendimento de etileno dada uma carga de nafta em craqueadores a vapor;
- **Limite de conversão – Carga de Etileno:** Até 80% da oferta global. Esta faixa corresponde ao rendimento de etileno dada uma carga de etileno em craqueadores a vapor;
- **Além da capacidade de conversão:** De 80% a 100% da oferta global. Esta faixa corresponde à níveis de conversão superiores aos de craqueadores a vapor, dada uma carga de etano;
- **Oferta Insuficiente:** Acima de 100% da oferta global. Nesta faixa, a demanda não-energética de gás natural supera a oferta de energia primária projetada pelo cenário. Nestes casos, a demanda estimada só poderá ser suprida com a utilização de matérias-primas alternativas.

Tabela 31 – Participação das demandas não-energéticas de gás natural sobre a oferta de energia primária para os 5 IMPs

	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
IMP-Ren	13%	22%	41%	85%	154%	284%	740%	1222%	1701%
IMP-LD	11%	26%	62%	46%	-	-	-	-	-
IMP-Neg	10%	10%	12%	18%	28%	36%	38%	62%	72%
IMP-SP	13%	16%	31%	68%	106%	173%	266%	326%	447%
IMP-GS	11%	14%	26%	54%	56%	50%	45%	50%	54%

Desta forma, temos que os cenários IMP-LD e IMP-GS seriam capazes de atender as demandas não-energéticas de gás natural para o setor petroquímico com um perfil do parque global de craqueadores a vapor baseado em etano. Especificamente no caso do IMP-Neg, como se trata de um cenário que ainda mantém uma participação significativa de combustíveis fósseis na sua matriz energética (BYERS et al., 2022; RIAHI et al., 2021), a participação de 72% da oferta direcionada para insumos da cadeia petroquímica pode se mostrar desafiadora devido a competição com os usos energéticos. Finalmente, os cenários IMP-Ren e IMP-SP seriam capazes de atender as demandas estimadas apenas através do uso de matérias-primas alternativas.

4.2.2 Defasagem de Olefinas e Aromáticos

Os gráficos apresentados da Figura 28 à Figura 32, apresentam a defasagem entre a demanda estimada para os demais químicos básicos (propileno, butenos e butadieno e aromáticos) com base nos rendimentos dos reatores de craqueadores a vapor e nos percentuais de participação desta fonte na oferta total destes produtos.

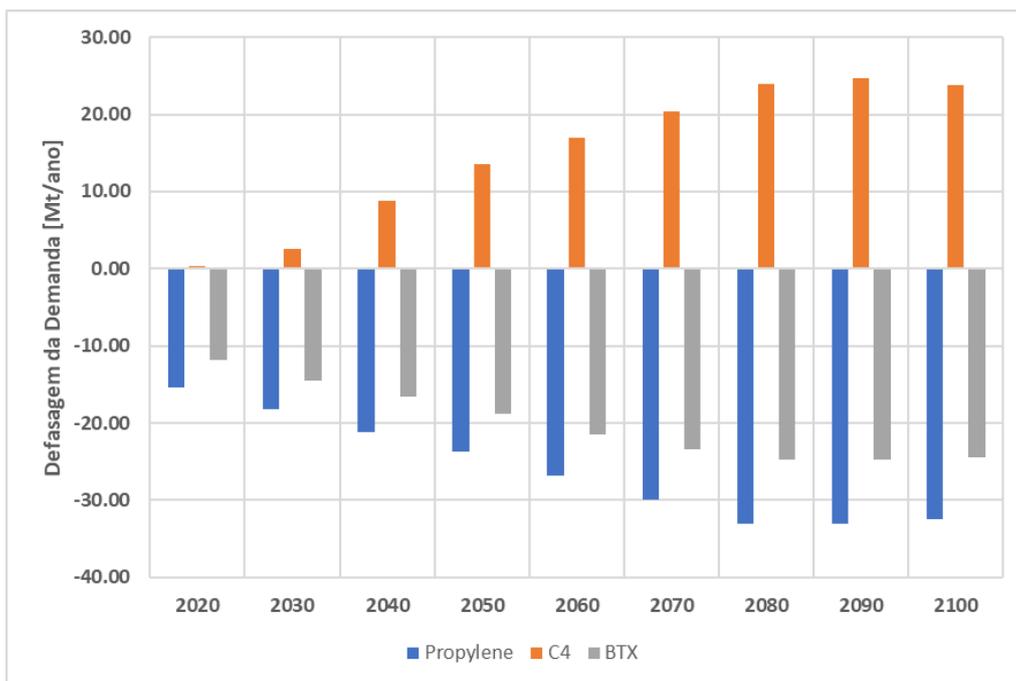


Figura 28 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-Ren

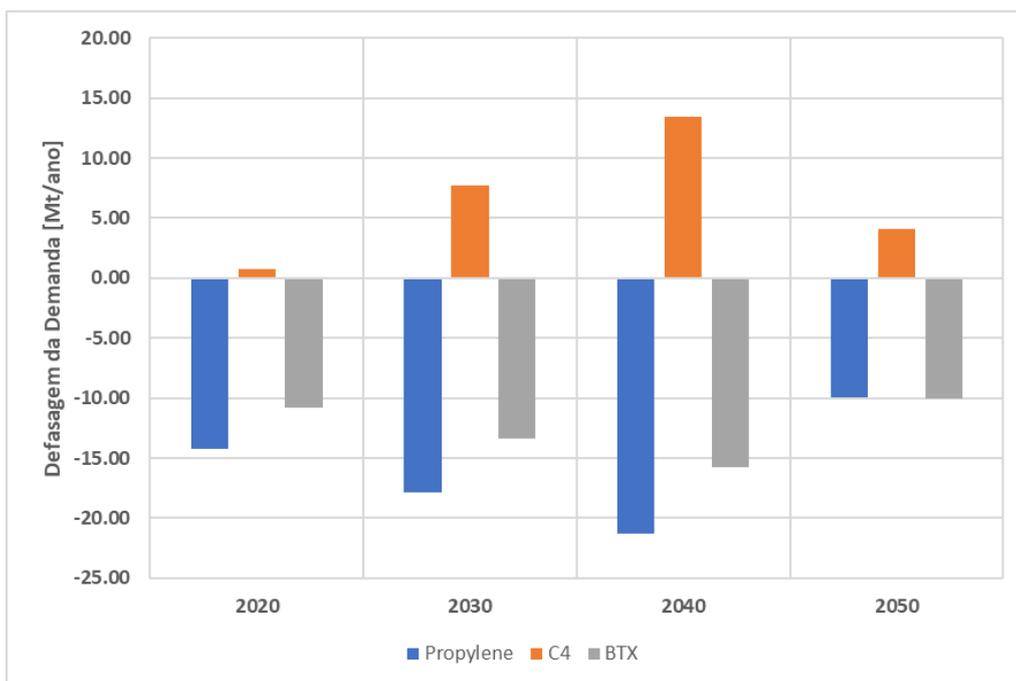


Figura 29 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-LD

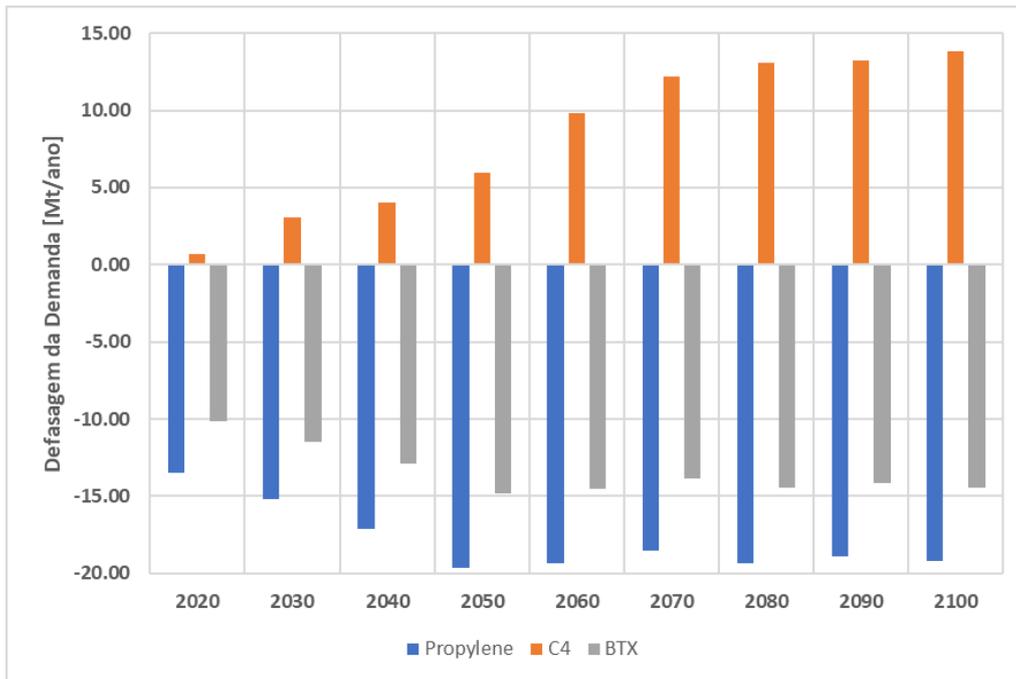


Figura 30 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-Neg

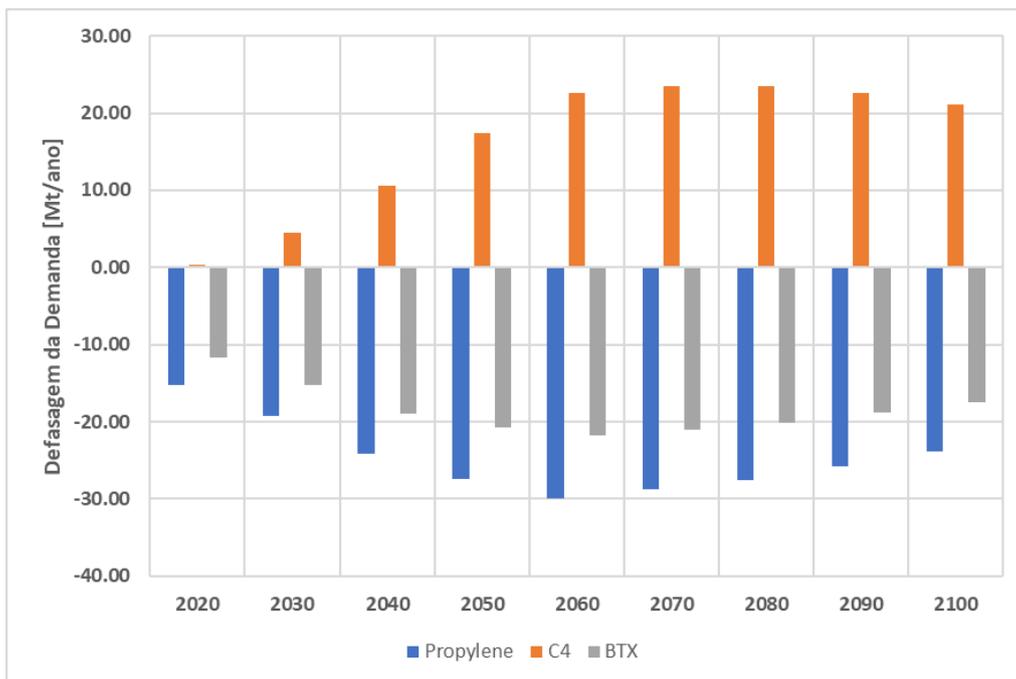


Figura 31 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-SP

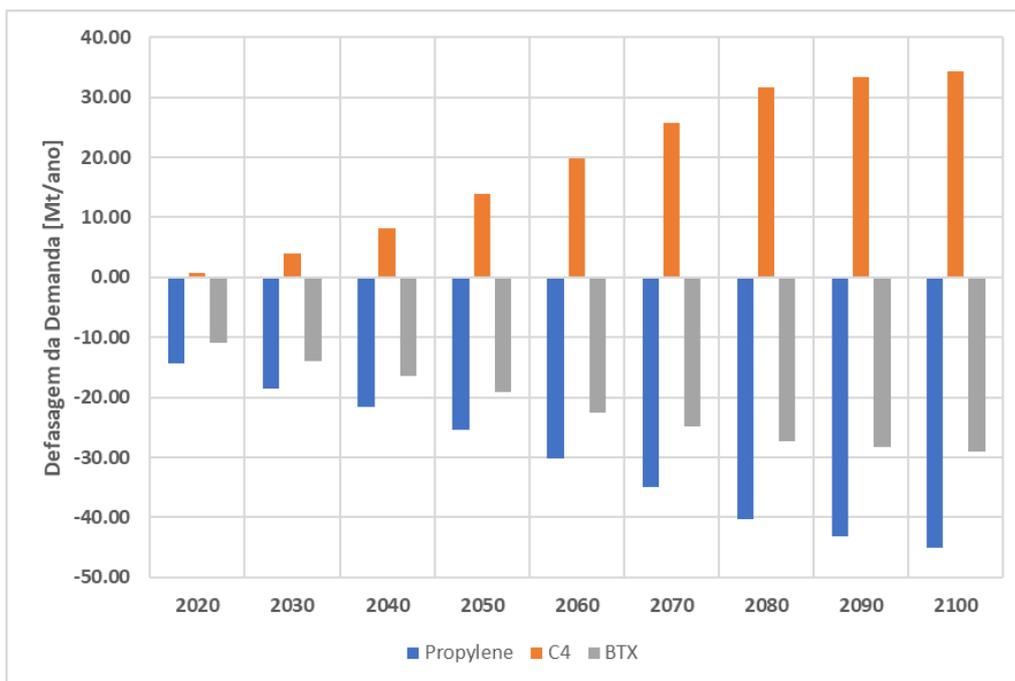


Figura 32 – Defasagens de produção de propileno, C4 e aromáticos a partir do craqueamento a vapor – IMP-GS

Com base nos resultados, é possível observar um déficit consistente de propileno e BTX ao longo do período avaliado. O parque global de craqueadores foi dimensionado para atender a demanda de etileno, que representa a maior demanda entre as olefinas. O propileno, butadienos e aromáticos produzidos por este processo são coprodutos.

O polipropileno é o segundo polímero com maior demanda na cadeia petroquímica para a produção de termoplásticos. De fato, se a demanda por polietileno for fracionada entre seus polímeros de baixa e alta densidade (LDPE/HDPE), o polipropileno se torna o polímero de maior demanda global. Além disso, a demanda por polipropileno vem apresentando um crescimento consistentemente superior ao do polietileno (HEINRITZ-ADRIAN; WENZEL; YOUSSEF, 2008), e o aumento da utilização de etano como insumo para o craqueamento a vapor, reduziu o rendimento médio de propileno a partir deste processo (MONAI et al., 2021).

Atualmente, o propileno produzido no craqueamento a vapor é complementado principalmente por correntes geradas diretamente em unidades de refino, principalmente FCC. Além destas fontes, existem rotas dedicadas de produção, como a metátese de olefinas (MTS), que produz propileno a partir de uma reação do etileno com 2-buteno ou a desidrogenação do propano (PDH), que, como o nome sugere, consiste na remoção de H₂ para a formação da ligação dupla do propileno através de uma reação catalítica (LEVI; CULLEN, 2018). Especialmente na China, temos a produção de olefinas em geral a partir de metanol (MTO), que por sua vez é produzido a partir de gaseificação do carvão, processo economicamente viável regionalmente devido a abundância da matéria-prima e aos altos custos associados as alternativas. Estas rotas alternativas constituem aproximadamente 20% da produção global de propileno. (KULPRATHIPANJA et al., 2021)

Dada a defasagem na taxa de crescimento entre as demandas de etileno e propileno, existe uma tendência de grande crescimento do déficit deste ao longo do tempo, como estimado nos resultados obtidos. Levando em conta a redução da produção de combustíveis líquidos nas refinarias, existe a possibilidade de que correntes de olefinas que hoje são tratadas para compor o pool de combustíveis possam ser aproveitadas liberando um fluxo maior de propileno e aromáticos destas fontes. Apesar disso, a intensidade com que o diferencial aumenta sugere a necessidade de adoção em larga escala de tecnologias dedicadas. Apesar de particularidades operacionais, a tecnologia de PDH tem se mostrado como uma rota de destaque devido à simplicidade do processo “um insumo-um produto” e especialmente devido ao *spread* de preço entre o propano e o propileno, tendo aumentado sua participação no mercado de 5% do total de propileno produzido em 2013 para 12% em 2019 (MONAI et al., 2021).

4.2.3 Modelagem Petroquímica em IAMs

Um desenvolvimento desejável para os IAMs seria uma melhor representação do setor petroquímico, conectando todos os elos da cadeia produtiva, desde a obtenção das matérias-primas (fósseis ou alternativas) até as opções de tratamento de resíduos, conforme abordado nas seções 2.5 e 2.4.3, passando pelas etapas de transformação de químicos básicos a produtos finais e considerando os diversos tempos de vida destes, de acordo com suas aplicações.

STEGMANN et al., 2022 implementaram um novo módulo, PLAIA (PLAstics Integrated Assessment model), ao IAM IMAGE inserindo uma representação rica do setor de plásticos, contribuindo para este desenvolvimento. Ainda assim, a estimativa de crescimento da demanda material nesta modelagem é dada de forma exógena, a partir de estimativas de crescimento anual do setor. Seria interessante a implementação de uma projeção endógena, similar à que foi realizada na presente análise, permitindo que as projeções dos setores de uso final dos IAMs sejam os vetores para suas respectivas demandas materiais, analogamente ao tratamento dado as demandas energéticas. Em outras iniciativas, DE OLIVEIRA et al., 2021b e LAP et al., 2019 introduziram um módulo petroquímico ao modelo Brazilian Land Use and Energy System (BLUES) e a uma versão Brasileira da ferramenta TIMES, respectivamente. Ao incorporar rotas de conversão petroquímica de matérias-primas fósseis e de biomassa, eles foram capazes de avaliar o uso não-energético de biomateriais e analisar seu potencial tanto para contribuição para mitigação das mudanças climáticas quanto na redução da demanda de óleo nas refinarias e de gás em plantas de processamento. Entretanto, ainda se faz necessária uma implementação deste tipo em IAMs de escopo global.

Além de uma modelagem adequada das tecnologias de conversão em si, o aproveitamento de sinergia entre processos, como a associação de rotas eletroquímicas, termoquímicas e biológicas como forma de reduzir a demanda de eletricidade para obtenção de químicos básicos partindo de fontes não fósseis (WOOD; YUAN; VIRDIS, 2023) ou a possibilidade de co-reciclagem química de produtos plásticos com produtos de carbono “natural” como madeira e celulose (CAÑETE VELA et al., 2022), também devem ser devidamente mapeadas como oportunidades para substituição de matéria-prima virgem para o setor petroquímico.

Outro fator crucial a ser implementado em qualquer modelagem, são as restrições à adoção de novas tecnologias, em especial para casos de baixo nível de maturidade e da escala com a qual devem ser inseridas. Em uma análise de descarbonização específica para o setor petroquímico, SAYGIN; GIELEN, 2021 avaliam de forma integrada a contribuição de 20 tecnologias diferentes para este fim e encontram um custo de mitigação de US\$64/tCO₂ para descarbonização completa do setor até 2050. As projeções realizadas, no entanto, implicam em níveis de crescimento desafiadores para capacidades de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS), de eletrolisadores para produção de hidrogênio verde e de produção de biomateriais. Além disso, tais projeções de incremento de capacidade de eletrolisadores também seriam desafiadoras quanto a disponibilidade de materiais críticos utilizados em sua produção (IEA, 2021a).

Ainda sob um viés tecnológico, a possibilidade de *lock-ins* também devem ser consideradas. A infraestrutura existente do setor petroquímico pode ser considerada relativamente nova, com a idade média global na faixa de 10 – 15 anos, em ativos que podem passar dos 30 anos de vida útil (BAUER et al., 2022b). Além disso, a própria natureza dos processos petroquímicos, que são projetados para uma fonte específica de matéria-prima para dar origem a um conjunto otimizado de produtos, apresentam um

elevado grau de integração material e energética e tendem a ser investimentos de grande porte devido às substanciais economias de escala, dificultando a implementação de modificações disruptivas. O alto grau de investimento em novas unidades baseadas em matéria-prima fóssil previsto para os próximos anos (ÇETINKAYA et al., 2022), bem como projetos *Crude-to-Chemicals*, representa um grande risco de *lock-in* para o setor, que alternativamente deveria aposentar as novas unidades antes do tempo, ou implementar modificações custosas para alterar a matéria-prima principal.

Riscos similares podem ser observados quanto ao tratamento final de resíduos. Apesar das grandes perdas de resíduos para o ambiente marinho devido ao manejo ou despejo inadequados (RYBERG et al., 2018), aterros sanitários são algumas vezes considerados uma forma de sumidouro de carbono devido à baixa taxa de decomposição do material plástico. O baixo custo desta alternativa dificulta a implementação de novos projetos de reciclagem, que seriam preferíveis para se atingir uma maior circularidade dentro do ciclo de vida dos plásticos, deslocando o consumo de matéria-prima virgem. Além disso, a vida útil dos incineradores pode ser considerada um outro *lock-in* do ponto de vista do tratamento, levando-se em consideração o fato de plásticos serem visados como matéria-prima para geração de energia devido ao seu alto poder calorífico (BAUER et al., 2022b), o que pode estimular sua demanda para este fim.

Para além do viés tecnológico, a possibilidade de *lock-ins* em outras dimensões também devem ser consideradas. Pelo aspecto da demanda, especificamente no caso dos plásticos, temos um produto de alta confiabilidade, aceitação e múltiplos usos, apontando para uma permanência em larga escala do seu uso nos próximos anos. A mitigação dos efeitos danosos dos plásticos ao clima e meio ambiente devem ser atacados através da adoção de hábitos de consumo mais conscientes. Por outro lado, as rotas propostas para descarbonização do setor petroquímico podem acarretar aumento do valor dos produtos

finais (SAYGIN; GIELEN, 2021), efeito que pode ocasionar a substituição ou redução do consumo.

Do ponto de vista organizacional, existe a possibilidade de *lock-in* devido à grande proximidade institucional entre os setores petroquímico e de óleo e gás, com grandes empresas do setor tendo altos níveis de integração (TILSTED et al., 2022). Estas conexões dificultam a desassociação do setor petroquímico da matéria-prima de origem fóssil, especialmente quando o setor é enxergado pela indústria como o principal motor de crescimento da demanda de óleo e gás no futuro devido à redução de demanda de combustíveis em razão da eletrificação do setor de transportes e crescimento das fontes renováveis no setor de geração elétrica (IEA, 2018). Neste aspecto, é interessante ressaltar a diferença de narrativa entre os dois setores. O setor de óleo e gás se apresenta como uma ponte para a transição energética, especialmente quando se refere à demanda de gás, uma vez que seu produto final é percebido como nocivo para as mudanças climáticas, e apresenta propostas de transição no longo prazo para o ramo de geração de energia de forma mais ampla. Por outro lado, o setor petroquímico se apresenta como essencial para implementação da mudança tecnológica, uma vez que um de seus produtos principais, os plásticos, seria material essencial para a transição, e desta forma, se posiciona como implementador naturais das tecnologias de descarbonização (BAUER et al., 2022b).

Finalmente, do ponto de vista da governança, globalmente são observáveis apenas medidas de restrição ao uso de plásticos descartáveis e alguns incentivos na transição para uma economia circular, especialmente na União Europeia e China (BAUER et al., 2022b; NIELSEN et al., 2020). Essas iniciativas, entretanto, pouco colaboram para um desacoplamento da indústria com matérias-primas fósseis. A existência de grandes petrolíferas estatais ou com participação estatal, também dificulta o incentivo de políticas

de redução da demanda de matéria-prima fóssil, de forma similar a discutida nos *lock-ins* organizacionais.

A incorporação desses aspectos em Modelos de Avaliação Integrada requer uma melhor compreensão e modelagem do comportamento humano, refletindo a heterogeneidade de grupos de consumidores, bem como a complexidade dos processos decisórios não-rationais observados nos mercados reais. Tal abordagem ofereceria avaliações mais interessantes para a orientação de tomadas de decisão políticas (MCCOLLUM et al., 2017).

5 Conclusões

Os resultados das simulações realizadas nesta dissertação apontaram que, *ceteris paribus*, dos cenários selecionados para análise, apenas os IMPs LD e Neg foram capazes de suprir as demandas estimadas por derivados de petróleo (21% e 31% da oferta primária global de petróleo, respectivamente) e gás natural (46% e 72% da oferta primária global de gás natural, respectivamente) ao longo do período analisado. O IMP-GS foi capaz de suprir as demandas estimadas apenas para o gás natural (56% da oferta primária global deste energético, enquanto os derivados de petróleo ultrapassaram 100% da oferta primária de petróleo). Assim, a hipótese explorada, acerca da inviabilidade de cenários de descarbonização intensa da economia, caso não sejam acompanhados de políticas de substituição e redução do uso de materiais derivados de matéria-prima fóssil, é corroborada pelos resultados obtidos.

Por um lado, os cenários para os quais as demandas estimadas por derivados de petróleo e de gás natural foram atendidas correspondem justamente aos dois únicos cenários para os quais medidas de redução de uso de materiais (IMP-LD) ou substituição de matéria-prima (IMP-Neg) foram aplicadas. Em situação oposta, os cenários IMP-Ren e IMP-SP, que apresentam as maiores restrições de oferta de gás natural ao fim do período, não foram capazes de suprir as demandas estimadas para nenhum dos energéticos (79% da oferta primária de petróleo e 1701% da de gás natural para o IMP-Ren e 166% e 447%, respectivamente para o IMP-SP), diante do perfil do parque de refino atual e previsto, conforme a sua capacidade de conversão de petróleo em insumos petroquímicos. Vale dizer que os IAMs adotados nesses cenários não possuem um detalhamento do parque

refinador que os tornaria capazes de realizar esse ajuste¹³. Apesar de o cenário IMP-GS atender a demanda material para o gás natural, os resultados desta dissertação mostram que esse cenário apresenta uma oferta de gás da ordem de 80 EJ/ano em 2100, muito superior àquela verificada nos demais cenários, justificando seu resultado mesmo sem medidas aplicadas as demandas não-energéticas.

De fato, com o crescimento populacional e econômico projetados para as próximas décadas, é esperado um impulsionamento do consumo dos produtos da cadeia petroquímica. Apesar das complexidades próprias deste setor e a baixa disponibilidade de dados abertos e confiáveis (BAUER et al., 2022b), faz-se, assim, necessária uma melhor compreensão de sua dinâmica, permitindo uma integração de sua modelagem a Modelos de Avaliação Integrada. O alinhamento de demandas materiais às respectivas forças motrizes associadas a seus usos finais permitiria o estabelecimento de umnexo entre políticas voltadas para combustíveis e materiais, possibilitando uma melhor compreensão do consumo de combustíveis fósseis em cenários de descarbonização.

Esse grau de refinamento nos IAMs permitiria não só estimar as demandas de combustíveis fósseis do setor, especialmente em se tratando das demandas não-energéticas, como também avaliar quais as melhores rotas alternativas para que essas demandas possam ser atendidas, como uso de biomateriais, combustíveis sintéticos atrelados a captura de CO₂ e hidrogênio verde, bem como aumento da reciclagem mecânica e química, para deslocamento da demanda de material virgem para o setor. A partir deste mapeamento, a proposição de políticas mais intensas voltadas a materiais permitiria um desenlace da contradição entre redução do consumo de materiais fósseis e atendimento de demandas materiais crescentes no setor petroquímico.

¹³ PIRES DOMINGUES CARDOSO GUEDES, 2019 desenvolveu o modelo ORION, que pode ser acoplado ao IAM COFFEE, permitindo tal nível de detalhamento na análise.

É importante reforçar que uma grande dificuldade para o desenvolvimento desta dissertação se deu no levantamento de dados a nível regional para as demandas de termoplásticos. Esse levantamento se mostrou um dos pontos críticos da elaboração do trabalho quanto ao esforço demandado, uma vez que os dados abertos e confiáveis da indústria petroquímica são de difícil obtenção, exigindo uma análise e tratamento para compatibilização das informações disponíveis. Vale ainda ressaltar que mesmo dados privados, não utilizados neste trabalho, quando disponíveis, majoritariamente estão focados em análises mercadológicas, não necessariamente adequadas para estudos da natureza desta dissertação. Essa dificuldade em parte se deve a complexidade da cadeia petroquímica quando comparada a setores como cimento e aço, por exemplo. Porém, dada a importância dessa cadeia nas discussões de descarbonização da economia, se mostra necessária uma maior transparência e padronização da disponibilização de dados de produção do setor.

Além disso, um tratamento adequado da modelagem comportamental seria útil para auxiliar no desenvolvimento de políticas de incentivo a mudança de hábitos de consumo e identificação de possíveis *lock-ins*, que poderiam representar barreiras para uma transição bem-sucedida.

Concluindo, a busca por atender as demandas materiais de longo prazo do setor petroquímico mantendo a meta de temperatura do Acordo de Paris requer um grande esforço de modelagem para este setor nos IAMs. Tal desafio envolveria um maior refinamento da cadeia produtiva de forma a permitir uma avaliação endógena das matérias-primas necessárias para o atendimento destas demandas. A inclusão de um bom mapeamento das tecnologias alternativas permitiria que os IAMs entregassem resultados ainda mais robustos para ajudar na orientação de elaboração de políticas direcionadas a um futuro mais sustentável de forma eficiente.

5.1 Limitações da Análise e Sugestões de Trabalhos Futuros

Uma das principais limitações desta modelagem é a falta de um refinamento regional. Ao trabalhar com valores médios em escala global, perdem-se informações relevantes sobre concentração de regiões produtoras e as dinâmicas de distribuição do mercado global. Além disso, essa regionalização permitiria uma representação mais adequada dos perfis de demanda material de cada região. Estes aspectos poderiam ser abordados de forma mais adequadas quando inseridos em um contexto de Modelagem Integrada, o que este autor encoraja que seja buscado em trabalhos futuros.

O balanço de massa utilizado para a estimativa dos químicos básicos a partir das intensidades de cada setor, proposto por LEVI; CULLEN, 2018, embora seja muito completo, reflete uma realidade de uma década atrás. Portanto, uma revisitação da cadeia de produção petroquímica poderia ser interessante para obtenção de um perfil mais atualizado de seus fluxos materiais.

Outra contribuição interessante para a modelagem seria uma avaliação mais profunda das demais aplicações do setor petroquímico, em especial as resinas termofixas e os solventes, mapeando seus principais setores de uso final, de forma a atrelar suas demandas a variáveis que representem mais adequadamente seus respectivos consumos. Ainda dentro deste viés, a simplificação do percentual de participação de demais produtos da cadeia petroquímica, fixado em 31% ao longo do período analisado, pode ser revisto e futuramente adotada uma abordagem mais dinâmica para este parâmetro.

De forma complementar à análise realizada, seria interessante uma avaliação dos impactos da demanda não-energética de produtos derivados de matérias-primas fósseis,

para além da petroquímica, em especial do refino de petróleo, como lubrificantes e asfaltos, por exemplo. Em conjunto com este estudo, essa análise forneceria uma visão mais completa a questão das demandas não-energéticas dos materiais fósseis frente a cenários de descarbonização.

Uma ampliação enriquecedora para a discussão, seria a avaliação pormenorizada das diferentes rotas de produção de biomateriais e e-materiais, sejam drop-in ou não. Um mapeamento das principais tecnologias disponíveis permitiria uma avaliação técnico-econômica complementar, possibilitando a identificação das rotas de substituição ótimas para os petroquímicos fósseis.

Finalmente, mas não menos importante, um aprofundamento da compreensão e modelagem das estratégias de economia circular (redução, reuso, reciclagem) na dinâmica do mercado poderia elucidar em que medida sua implementação é capaz de atenuar a disparidade entre oferta e demanda de materiais. Aqui, um detalhamento da permanência dos produtos na economia em função de suas variadas aplicações e usos finais, em conjunto com um mapeamento das possíveis destinações finais, em especial para a opção de reciclagem, incluindo custos associados a todas as etapas do processo e possíveis rotas tecnológicas, contribuiria não só para uma melhor descrição da substituição das demandas fósseis virgens, como também possibilitaria refinar a avaliação dos impactos de emissão de GEE associados ao setor petroquímico.

6 Referências Bibliográficas

ABIQUIM. **Demanda de matérias-primas petroquímicas e provável origem até 2025.**

[s.l: s.n.].

ACHAKULWISUT, P. et al. Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions. **Nature Communications**, 13 set. 2023.

ACHARYA, M. et al. Transforming Oil Refining in a Deeply Decarbonized World. Em: **Routledge Handbook of Energy Transitions**. [s.l.] Routledge, 2022. p. 127–144.

AFTALION, F. **A history of the international chemical industry**. [s.l.] University of Pennsylvania Press, 1991.

AKAH, A.; AL-GHRAMI, M. Maximizing propylene production via FCC technology. **Applied Petrochemical Research**, v. 5, n. 4, p. 377–392, dez. 2015.

ALLWOOD, J. M. et al. Material efficiency: A white paper. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 3, p. 362–381, jan. 2011.

AL-QAHTANI, K.; ELKAMEL, A. Multisite refinery and petrochemical network design: Optimal integration and coordination. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 48, n. 2, p. 814–826, 21 jan. 2009.

ATC. **Document 118 - Lubricant Additives: Use and Benefits**. Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe AISBL (ATC), , ago. 2016.

ATC. **Document 113 - Fuel Additives: Use and Benefits**. Technical Committee of Petroleum Additive Manufacturers in Europe AISBL (ATC), , jun. 2020.

BAENA-MORENO, F. M. et al. Bio-methane and bio-methanol co-production from biogas: A profitability analysis to explore new sustainable chemical processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 265, 20 ago. 2020.

BAKER, I. Celluloid. Em: **Fifty Materials That Make the World**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 23–27.

BASHMAKOV, I. A. et al. Industry. In IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Em: SHUKLA, P. R. et al. (Eds.). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022. p. 1161–1244.

BAUER, F. et al. Plastics and climate change breaking carbon lock-ins through three mitigation pathways. **One Earth**, v. 5, n. 4, p. 361–376, 15 abr. 2022a.

BAUER, F. et al. **Plastics and climate change breaking carbon lock-ins through three mitigation pathways**. **One Earth** Cell Press, , 15 abr. 2022b.

BAUER, FREDRIC. et al. **Petrochemicals and Climate Change: Tracing Globally Growing Emissions and Key Blind Spots in a Fossil-Based Industry**. Lund: [s.n.].

BAZZANELLA, A. M.; AUSFELDER, F.; DECHEMA. **Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry**. Frankfurt am Main: [s.n.].

BELL, L.; TAKADA, H. **Plastic Waste Management Hazards**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://pelletwatch.org/>>.

BERGMAN-FONTE, C. et al. Repurposing, co-processing and greenhouse gas mitigation – The Brazilian refining sector under deep decarbonization scenarios: A case study using integrated assessment modeling. **Energy**, v. 282, p. 128435, nov. 2023.

BPF. **A History of Plastics.** Disponível em: <https://www.bpf.co.uk/plastipedia/plastics_history/Default.aspx>. Acesso em: 30 set. 2023.

BRANTES ANGELKORTE, G. **OPORTUNIDADES PARA A TRANSIÇÃO SUSTENTÁVEL DA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA.** Tese de Doutorado—Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, jul. 2023.

BYERS, E. et al. **AR6 Scenarios Database.**

CAÑETE VELA, I. et al. Co-recycling of natural and synthetic carbon materials for a sustainable circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 365, 10 set. 2022.

CARRARA, S. et al. **Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, EUR 30095 EN.** Luxemburg: [s.n.]. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/jrc>>.

ÇETINKAYA, E. et al. **Excellence in petrochemicals: What it will take to win.** Disponível em: <[https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/excellence-in-petrochemicals-what-it-will-take-to-win#/>](https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/excellence-in-petrochemicals-what-it-will-take-to-win#/). Acesso em: 23 fev. 2024.

CHANGING MARKETS FOUNDATION. **Fossil Fashion - The hidden reliance of fast fashion on fossil fuels.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.changingmarkets.org>.

CNI. **ESPECIFICAÇÃO DO GÁS NATURAL: OPORTUNIDADES E EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL.** Brasília: [s.n.].

COX, K. D. et al. Human Consumption of Microplastics. **Environmental Science and Technology**, v. 53, n. 12, p. 7068–7074, 18 jun. 2019.

CRESPI, D.; BOZONNET, M.; MEIER, M. **100 Years of Bakelite, the material of a 1000 uses.** *Angewandte Chemie - International Edition*, 21 abr. 2008.

DA SILVA, M. W. Closing the sustainability cycle. *PTQ*, mar. 2023.

DANIEL POSEN, I. et al. Greenhouse gas mitigation for U.S. plastics production: Energy first, feedstocks later. *Environmental Research Letters*, v. 12, n. 3, 16 mar. 2017.

DE OLIVEIRA, C. C. N. et al. Achieving negative emissions in plastics life cycles through the conversion of biomass feedstock. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 15, n. 2, p. 430–453, 1 mar. 2021a.

DE OLIVEIRA, C. C. N. et al. The role of biomaterials for the energy transition from the lens of a national integrated assessment model. *Climatic Change*, v. 167, n. 3–4, 1 ago. 2021b.

DROUET, L. et al. Net zero-emission pathways reduce the physical and economic risks of climate change. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 12, p. 1070–1076, 1 dez. 2021.

EUROPEAN BIOPLASTICS. **Bioplastics market data.** Disponível em: <<https://www.european-bioplastics.org/market/>>. Acesso em: 28 nov. 2022.

FAO. **Fertilizers by Product.** Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/RFB>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

FORSDYKE, K. L.; STARR, T. F. **Thermoset Resins Market Report.** Shrewsbury, UK: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.rapra.net>>.

GELDER, A. **Petrochemical integration defines long term downstream winners and losers.** [s.l.: s.n.].

GELDER, A. **Refinery-petrochemical integration disrupts gas-based cracker feedstock advantage.** Disponível em:

<<https://www.woodmac.com/news/opinion/refinery-petrochemical-integration-gas-based-cracker-feedstock/>>. Acesso em: 1 ago. 2023.

GERVAIS, E. et al. Raw material needs for the large-scale deployment of photovoltaics – Effects of innovation-driven roadmaps on material constraints until 2050. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 137, 1 mar. 2021.

GILBERT, M. **Brydson's Plastics Materials**. 8th Ed. ed. Oxford, UK: Elsevier Ltd., 2017.

GRAND VIEW RESEARCH. **Plastic Packaging Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Rigid, Flexible), By Technology (Injection Molding, Extrusion, Blow Molding), By Application, By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030**. Disponível em: <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/plastic-packaging-market>>. Acesso em: 9 nov. 2023.

GREENPEACE. **Forever Toxic**. Washington: [s.n.].

GRUBLER, A. et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °c target and sustainable development goals without negative emission technologies. **Nature Energy**, v. 3, n. 6, p. 515–527, 1 jun. 2018.

HAMILTON, L. A. et al. **Plastic & Climate: The Hidden Costs of a Plastic Planet**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.ciel.org/plasticandclimate>.

HARAM, L. E. et al. Extent and reproduction of coastal species on plastic debris in the North Pacific Subtropical Gyre. **Nature Ecology and Evolution**, v. 7, n. 5, p. 687–697, 1 maio 2023.

HARPER, C. A. **Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites**. 4th Ed. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2004.

HEINRITZ-ADRIAN, M.; WENZEL, S.; YOUSSEF, F. Advanced Propane Dehydrogenation - Oxdehydrogenation-based on-purpose propane dehydrogenation can close the propylene supply-demand gap. **Digital Refining**, 2008.

HILLMYER, M. A. **The promise of plastics from plants**. Science American Association for the Advancement of Science, , 17 nov. 2017.

HOU, T. et al. **Hydrogen production from ethanol reforming: Catalysts and reaction mechanism**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 2015.

HUPPMANN, D. et al. The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development. **Environmental Modelling and Software**, v. 112, p. 143–156, 1 fev. 2019.

IEA. **The Future of Petrochemicals - Towards more sustainable plastics and fertilisers**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.iea.org/t&c/>.

IEA. **Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.iea.org/t&c/>.

IEA. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.iea.org/t&c/>.

IEA. **Ammonia Technology Roadmap - Towards more sustainable nitrogen fertiliser production**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.iea.org/t&c/>.

IEA. **Energy Technology Perspectives 2023**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.iea.org/>.

- IEA. **Global Hydrogen Review 2023**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <www.iea.org>.
- IEA; OCDE. **Energy technology transitions for industry: Strategies for the next industrial revolution**. [s.l.] OECD/IEA, 2009.
- IFA. **IFA Fertilizer Converter**. Disponível em: <<https://www.ifastat.org/converter/fertilizer-converter/>>. Acesso em: 13 nov. 2023.
- JENNER, L. C. et al. Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. **Science of the Total Environment**, v. 831, 20 jul. 2022.
- JOHNSON, E. **Process technologies and projects for BiOLPG**. **Energies**MDPI AG, , 15 jan. 2019.
- KAMINSKY, W. **Plastics, Recycling**, 15 jun. 2000. (Nota técnica).
- KÄTELHÖN, A. et al. Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 166, n. 23, p. 11187–11194, 2019.
- KLEMCHUK, P. P. **Antioxidants**, 15 jun. 2000. (Nota técnica).
- KOOTTUNGAL, L. INTERNATIONAL SURVEY OF ETHYLENE FROM STEAM CRACKERS—2015. **Oil & Gas Journal**, p. 85–91, 6 jun. 2015.
- KULPRATHIPANJA, S. et al. **Modern Petrochemical Technology - Methods, Manufacturing and Applications**. 1srt. ed. Weinheim, Germany: WILEY-VCH GmbH, 2021.
- LAP, T. et al. Pathways for a Brazilian biobased economy: towards optimal utilization of biomass. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 13, n. 3, p. 673–689, 1 maio 2019.

LECOCQ, F. et al. Mitigation and Development Pathways in the Near to Mid-term. Em: **Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change**. [s.l.] Cambridge University Press, 2023. p. 409–502.

LESLIE, H. A. et al. Discovery and quantification of plastic particle pollution in human blood. **Environment International**, v. 163, 1 maio 2022.

LEVI, P. G.; CULLEN, J. M. Mapping Global Flows of Chemicals: From Fossil Fuel Feedstocks to Chemical Products. **Environmental Science and Technology**, v. 52, n. 4, p. 1725–1734, 20 fev. 2018.

LIANG, Y. et al. **Material requirements for low-carbon energy technologies: A quantitative review**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 1 jun. 2022.

LO PIANO, S.; SALTELLI, A.; VAN DER SLUIJS, J. P. Silver as a constraint for a large-scale development of solar photovoltaics? Scenario-making to the year 2050 supported by expert engagement and global sensitivity analysis. **Frontiers in Energy Research**, v. 7, n. JUN, 2019.

LUDERER, G. et al. Impact of declining renewable energy costs on electrification in low-emission scenarios. **Nature Energy**, v. 7, n. 1, p. 32–42, 1 jan. 2022.

MAIA, P. L. B. **ANÁLISE DE FATORES LIMITANTES PARA IDENTIFICAÇÃO DE HOTSPOTS DE APLICAÇÃO DE CAPTURA DIRETA DE CO₂ DO AR (DAC) – ESTUDO DE CASO PARA O BRASIL**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, abr. 2021.

MATAR, S.; F. HATCH, L. **Chemistry of Petrochemical Processes**. 2nd. ed. Houston, Texas: Gulf Publishing Company, 2000.

MATERIAL ECONOMICS. **The Circular Economy - A Powerful Force for Climate Mitigation Transformative innovation for prosperous and low-carbon industry.** Stockholm: [s.n.].

MATERIAL ECONOMICS. **Sustainable Packaging - The Role of Materials Substitution.** Stockholm: [s.n.].

MATERIAL ECONOMICS. **Preserving value in EU industrial materials - A value perspective on the use of steel, plastics, and aluminium.** Stockholm: [s.n.].

MATERIAL ECONOMICS. **EU Biomass Use in a Net-Zero Economy - A course correction for EU biomass.** Stockholm: [s.n.].

MATERIĆ, D. et al. Nanoplastics measurements in Northern and Southern polar ice. **Environmental Research**, v. 208, 15 maio 2022.

MBOW, C. et al. Food Security. Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Em: **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.** [s.l.] Cambridge University Press, 2022. p. 437–550.

MCCOLLUM, D. L. et al. Improving the behavioral realism of global integrated assessment models: An application to consumers' vehicle choices. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 55, p. 322–342, 1 ago. 2017.

MENG, F. et al. Planet-compatible pathways for transitioning the chemical industry. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 120, n. 8, 21 fev. 2023.

MEYERS, S.; SHANLEY, E. S. INDUSTRIAL EXPLOSIVES-A BRIEF HISTORY OF THEIR DEVELOPMENT AND USE. **Journal of Hazardous Materials**, v. 23, p. 183–201, 1990.

MONAI, M. et al. **Propane to olefins tandem catalysis: A selective route towards light olefins production**. **Chemical Society Reviews**Royal Society of Chemistry, , 21 out. 2021.

MORGAN, P. W. Brief History of Fibers from Synthetic Polymers. **Journal of Macromolecular Science: Part A - Chemistry**, v. 15, n. 6, p. 1113–1131, 1981.

MULLER, A. et al. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. **Nature Communications**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2017.

MÜLLER-CASSERES, E. et al. Are there synergies in the decarbonization of aviation and shipping? An integrated perspective for the case of Brazil. **iScience**, v. 25, n. 10, p. 105248, out. 2022.

NAPPER, I. E. et al. Reaching New Heights in Plastic Pollution—Preliminary Findings of Microplastics on Mount Everest. **One Earth**, v. 3, n. 5, p. 621–630, 20 nov. 2020.

NASCIMENTO DA SILVA, G.; ROCHEDO, P. R. R.; SZKLO, A. Renewable hydrogen production to deal with wind power surpluses and mitigate carbon dioxide emissions from oil refineries. **Applied Energy**, v. 311, 1 abr. 2022.

NI, M.; LEUNG, D. Y. C.; LEUNG, M. K. H. **A review on reforming bio-ethanol for hydrogen production**. **International Journal of Hydrogen Energy**Elsevier Ltd, , 2007.

NIELSEN, T. D. et al. **Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle**. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**John Wiley and Sons Ltd, , 1 jan. 2020.

OECD. **Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options**. Paris: OECD Publishing, 2022.

OECD. **Global Plastics Outlook: Plastics use by polymer - projections**. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/environment/data/global-plastics-outlook/plastics-use-by-polymer-projections_b9bae4d1-en?parentId=http%3A%2F%2Finstance.metastore.ingenta.com%2Fcontent%2Fthematic-grouping%2Fc0821f81-en>. Acesso em: 1 nov. 2023a.

OECD. **Global Plastics Outlook: Plastics use by application**. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/environment/data/global-plastic-outlook/plastics-use-by-application_234a9f22-en?parentId=http%3A%2F%2Finstance.metastore.ingenta.com%2Fcontent%2Fthematic-grouping%2Fc0821f81-en>. Acesso em: 19 dez. 2023b.

OECD. **Global Plastics Outlook: Plastics use by region**. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/environment/data/global-plastic-outlook/plastics-use-by-region_bab5b88f-en?parentId=http%3A%2F%2Finstance.metastore.ingenta.com%2Fcontent%2Fthematic-grouping%2Fc0821f81-en>. Acesso em: 19 dez. 2023c.

OECD. **Labour Force Statistics: Historical population data**. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/employment/data/labour-force-statistics/historical-population-data_4cf3d106-en>. Acesso em: 19 dez. 2023d.

O'NEILL, B. C. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169–180, 1 jan. 2017.

OPPERSKALSKI, S. et al. **Preferred Fiber & Materials Market Report**. [s.l.: s.n.].

PBL NETHERLAND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT AGENCY. **Welcome to IMAGE 3.2 Documentation - IMAGE.** Disponível em: <https://models.pbl.nl/image/index.php/Welcome_to_IMAGE_3.2_Documentation>.

Acesso em: 10 fev. 2024.

PENG, X. et al. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. **Geochemical Perspectives Letters**, v. 9, p. 1–5, 2018.

PERSSON, L. et al. Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities. **Environmental Science and Technology**, v. 56, n. 3, p. 1510–1521, 1 fev. 2022.

PETROBRAS. **Refinaria Henrique Lage (Revap).** Disponível em: <<https://www.petrobras.com.br/quem-somos/refinaria-henrique-lage>>. Acesso em: 13 fev. 2024.

PINHEIRO, H. T. et al. Plastic pollution on the world's coral reefs. **Nature**, v. 619, n. 7969, p. 311–316, 13 jul. 2023.

PIRES DOMINGUES CARDOSO GUEDES, F. A **MULTI-REGIONAL OPTIMIZATION MODEL FOR THE BRAZILIAN OIL REFINING INDUSTRY.** Tese de Doutorado—Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, dez. 2019.

PLASTICSEUROPE. **Plastics - the Facts 2020 - An analysis of European plastics production, demand and waste data.** Brussels: [s.n.].

POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH. **REMIND - Postdam Institute for Climate Impact Research.** Disponível em: <<https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/transformation-pathways/models/remind>>. Acesso em: 10 fev. 2024a.

POTSDAM INSTITUTE FOR CLIMATE IMPACT RESEARCH. **MAGPIE – Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment - Postdam Institute for Climate Impact Research**. Disponível em: <<https://www.pik-potsdam.de/en/institute/departments/activities/land-use-modelling/magpie/magpie-2013-model-of-agricultural-production-and-its-impact-on-the-environment>>. Acesso em: 10 fev. 2024b.

RAGUSA, A. et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. **Polymers**, v. 14, n. 13, 1 jul. 2022.

RAI, P. et al. **Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers**. **Bioresource Technology** Elsevier Ltd, , 1 abr. 2021.

RASMUSSEN, S. C. From Parkesine to Celluloid: The Birth of Organic Plastics. **Angewandte Chemie - International Edition**, v. 60, n. 15, p. 8012–8016, 6 abr. 2021.

RFF-CMCC EUROPEAN INSTITUTE ON ECONOMICS AND THE ENVIRONMENT (EIEE). **Model - The WITCH Model**. Disponível em: <<https://www.witchmodel.org/model/>>. Acesso em: 10 fev. 2024.

RIAHI, K. et al. Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 12, p. 1063–1069, 1 dez. 2021.

ROBAINA, M. et al. Circular economy in plastic waste - Efficiency analysis of European countries. **Science of the Total Environment**, v. 730, 15 ago. 2020.

ROCHEDO, P. R. R. **DEVELOPMENT OF A GLOBAL INTEGRATED ENERGY MODEL TO EVALUATE THE BRAZILIAN ROLE IN CLIMATE CHANGE MITIGATION SCENARIOS**. Tese de Doutorado—Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, ago. 2016.

ROCHEDO, P. R. R. et al. **The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil.** *Nature Climate Change* Nature Publishing Group, , 1 ago. 2018.

ROELFSEMA, M. et al. Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement. *Nature Communications*, v. 11, n. 1, 1 dez. 2020.

ROELFSEMA, M. et al. Developing scenarios in the context of the Paris Agreement and application in the integrated assessment model IMAGE: A framework for bridging the policy-modelling divide. *Environmental Science and Policy*, v. 135, p. 104–116, 1 set. 2022.

ROGELJ, J. et al. **Energy system transformations for limiting end-of-century warming to below 1.5 °C.** *Nature Climate Change* Nature Publishing Group, , 26 jun. 2015.

ROGELJ, J. et al. **Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °c.** *Nature* Nature Publishing Group, , 29 jun. 2016.

ROGELJ, J. et al. Credibility gap in net-zero climate targets leaves world at high risk. *Science*, v. 380, n. 6649, p. 1014–1016, 9 jun. 2023.

ROYER, S. J. et al. Production of methane and ethylene from plastic in the environment. *PLoS ONE*, v. 13, n. 8, 1 ago. 2018.

RYBERG, M. W. et al. **Mapping of global plastics value chain and plastics losses to the environment - With a particular focus on marine environment.** Nairobi: [s.n.].

SANTOS, F. A. et al. Plastic debris forms: Rock analogues emerging from marine pollution. *Marine Pollution Bulletin*, v. 182, 1 set. 2022.

SAYGIN, D.; GIELEN, D. Zero-emission pathway for the global chemical and petrochemical sector. **Energies**, v. 14, n. 13, 1 jul. 2021.

SCHERER, H. W. et al. **Fertilizers**, 15 dez. 2006. (Nota técnica).

SCHÖNTHALER, W.; SCHÖNTHALER, S. **Thermosets**, 15 jun. 2000. (Nota técnica).

SCOTT, A.; et al. **Phasing out plastics**. London: [s.n.]. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10419/233930>>.

SEI et al. **The Production Gap: Phasing down or phasing up? Top fossil fuel producers plan even more extraction despite climate promises**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.sei.org/publications/production-gap-report-2023/>>.

SHUKLA, P. R. et al. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report**. Cambridge, UK and New York, NY, USA: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf>>.

SILVA, A. C. Q. et al. Natural polymers-based materials: A contribution to a greener future. **Molecules**, v. 27, n. 1, 1 jan. 2022.

SKEA, J. et al. Outlooks, explorations and normative scenarios: Approaches to global energy futures compared. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 168, 1 jul. 2021.

SOERGEL, B. et al. A sustainable development pathway for climate action within the UN 2030 Agenda. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 8, p. 656–664, 1 ago. 2021.

S&P GLOBAL. **Ammonium Nitrate**. Disponível em: <<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/ammonium-nitrate-chemical-economics-handbook.html>>. Acesso em: 14 nov. 2023a.

S&P GLOBAL. **MTBE, ETBE and Other Octane Improvers**. Disponível em: <<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/gasoline-octane-improvers-chemical-economics-handbook.html>>. Acesso em: 29 out. 2023b.

S&P GLOBAL COMMODITY INSIGHTS. **Butylenes**. Disponível em: <<https://www.spglobal.com/commodityinsights/en/ci/products/butylenes-chemical-economics-handbook.html>>. Acesso em: 29 out. 2023.

STATISTA. **Production capacity of methyl tertiary butyl ether worldwide in 2018 and 2023**. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/1067431/mtbe-production-capacity-globally/>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

STEGMANN, P. et al. Plastic futures and their CO2 emissions. **Nature**, v. 612, n. 7939, p. 272–276, 8 dez. 2022.

STOYE, D. **Solvents**, 15 jun. 2000. (Nota técnica).

STOYE, D. et al. **Paints and Coatings**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, , 15 dez. 2006. (Nota técnica).

SUNDARAM, K. M. et al. Crude to chemicals: Part 1 – The basic concept of crudes. **PTQ Q4**, p. 43–49, 2023.

SUNDARAM, K. M. et al. Crude to chemicals: Part 2. **PTQ Q1**, p. 51–57, 2024.

SZKLO, A. S.; ULLER, V. C.; BONFÁ, M. H. P. **Fundamentos do Refino de Petróleo -Tecnologia e Economia**. 3ª Ed. ed. Rio de Janeiro - RJ: Interciência, 2012a.

SZKLO, A. S.; ULLER, V. C.; BONFÁ, M. H. P. **Fundamentos do Refino de Petróleo - Tecnologia e Economia**. 3ª edição ed. Rio de Janeiro - RJ: Editora Interciência Ltda., 2012b.

THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. et al. **Waste**, 15 jan. 2008. (Nota técnica).

THREADINGHAM, D. et al. **Rubber**, 3. **Synthetic**Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, , 30 abr. 2004. (Nota técnica).

TILSTED, J. P. et al. Petrochemical transition narratives: Selling fossil fuel solutions in a decarbonizing world. **Energy Research and Social Science**, v. 94, 1 dez. 2022.

TREVISAN, R. **MATÉRIA**. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/mat%C3%A9ria/>>. Acesso em: 30 set. 2023.

UNEP. **UNEP/PP/INC.1/14 - Report of the intergovernmental negotiating committee to develop an international legally binding instrument on plastic pollution, including in the marine environment, on the work of its first session**. Punta del Este: [s.n.].

Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/42569/28052023_India.pdf>.

UNEP. **UNEP/PP/INC.2/4 - Potential options for elements towards an international legally binding instrument, based on a comprehensive approach that addresses the full life cycle of plastics as called for by United Nations Environment Assembly resolution 5/14**. Paris: [s.n.]. Disponível em:

<<https://www.unep.org/events/conference/second-session-intergovernmental-negotiating-committee-develop->>.

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015 Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twenty-first session**. FCCC/CP/2015/10/Add.1.

Anais...Paris: United Nations Framework Convention on Climate Change, 29 jan. 2016.

Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2024

UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its twenty-second session, held in Marrakech from 7 to 18 November 2016 Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twentysecond session. FCCC/CP/2016/11/Add.1. **Anais...**Marrakech: United Nations Framework Convention on Climate Change, 31 jan. 2017. Disponível em: <<https://unfccc.int/resource/docs/2016/cop22/eng/10a01.pdf#page=2>>. Acesso em: 12 fev. 2024

UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its twenty-third session, held in Bonn from 6 to 18 November 2017 Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twentythird session. FCCC/CP/2017/11/Add.1. **Anais...**Bonn: United Nations Framework Convention on Climate Change, 8 fev. 2018. Disponível em: <https://unfccc.int/event/cop-23#decisions_reports>. Acesso em: 12 fev. 2024

UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its twenty-fourth session, held in Katowice from 2 to 15 December 2018 Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twentyfourth session. FCCC/CP/2018/10/Add. **Anais...**Katowice: United Nations Framework Convention on Climate Change, 19 mar. 2019. Disponível em: <https://unfccc.int/event/cop-25#decisions_reports>. Acesso em: 12 fev. 2024

UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its twenty-fifth session, held in Madrid from 2 to 15 December 2019 Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twentyfifth session. FCCC/CP/2019/13/Add.1. **Anais...**Madrid: United Nations Framework Convention on Climate Change, 16 mar. 2020. Disponível em: <https://unfccc.int/event/cop-25#decisions_reports>. Acesso em: 12 fev. 2024

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-sixth session, held in Glasgow from 31 October to 13 November 2021 Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twentysixth session.** FCCC/CP/2021/12/Add.1. **Anais...**Glasgow: United Nations Framework Convention on Climate Change, 8 mar. 2022. Disponível em: <https://unfccc.int/event/cop-26#decisions_reports>. Acesso em: 12 fev. 2024

UNFCCC. **Report of the Conference of the Parties on its twenty-seventh session, held in Sharm el-Sheikh from 6 to 20 November 2022 Addendum Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its twentyseventh session.** FCCC/CP/2022/10/Add.1. **Anais...**Sharm el-Sheikh: United Nations Framework Convention on Climate Change, 17 mar. 2023a. Disponível em: <https://unfccc.int/event/cop-27?item=19#decisions_reports>. Acesso em: 12 fev. 2024

UNFCCC. **Outcome of the first global stocktake.** FCCC/PA/CMA/2023/L.17. **Anais...**Dubai: United Nations Framework Convention on Climate Change, 13 dez. 2023b. Disponível em: <<https://unfccc.int/documents/636608>>. Acesso em: 12 fev. 2024

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Hydrogen Production Processes.** Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-processes#:~:text=Direct%20solar%20water%20splitting%2C%20or,production%20with%20low%20environmental%20impact.>>>. Acesso em: 1 nov. 2023.

VAN SOEST, H. L. et al. Global roll-out of comprehensive policy measures may aid in bridging emissions gap. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, 1 dez. 2021.

VARTANIAN, P. F. The Chemistry of Modern Petroleum Product Additives. **Journal of Chemical Education**, v. 68, n. 12, p. 1015–1020, dez. 1991.

WANG, P. et al. Critical mineral constraints in global renewable scenarios under 1.5 °C target. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 12, 1 dez. 2022.

WANG, Y. et al. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. **Environmental Chemistry Letters**, 1 dez. 2023.

WANG, Z.; GANEWATTA, M. S.; TANG, C. **Sustainable polymers from biomass: Bridging chemistry with materials and processing. Progress in Polymer Science** Elsevier Ltd, , 1 fev. 2020.

WILLIAMS, M.; GOWER, R.; GREEN, J. **NO TIME TO WASTE - Tackling the plastic pollution crisis before it's too late.** Teddington, UK: [s.n.].

WOOD, J. C.; YUAN, Z.; VIRDIS, B. **Towards carbon neutral chemicals production: Opportunities for combining fermentation with electrochemical processes. Current Opinion in Electrochemistry** Elsevier B.V., , 1 fev. 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION.; INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **1,3-Butadiene, ethylene oxide and vinyl halides (vinyl fluoride, vinyl chloride and vinyl bromide).** [s.l.] International Agency for Research on Cancer Press, 2008.

ZENG, A. et al. Battery technology and recycling alone will not save the electric mobility transition from future cobalt shortages. **Nature Communications**, v. 13, n. 1, 1 dez. 2022.

ZHENG, J.; SUH, S. **Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. Nature Climate Change** Nature Publishing Group, , 1 maio 2019.

ZHU, Y.; ROMAIN, C.; WILLIAMS, C. K. **Sustainable polymers from renewable resources. Nature** Nature Publishing Group, , 14 dez. 2016.

ANEXO I Informação Complementar

I.1 Histórico da Demanda de Plásticos

A tabela a seguir apresenta as fontes de dados para os levantamentos de histórico de demanda de plásticos para cada país analisado, bem como os grupamentos de países por suas respectivas regiões.

Tabela A 1 – Dados de Demanda de Termoplásticos dos Países e Dsistribuições Regionais

Região	País	Fonte	
		Participação no Consumo de Termoplásticos	Participação do setor de uso final
ÁFRICA	Argélia	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Benim	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Botsuana	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Bukina Faso	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Burundi	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)

Região	País	Fonte	
		Participação no Consumo de Termoplásticos	Participação do setor de uso final
	Camarões	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Cabo Verde	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Egito	(YAHIA, 2013)	(MIKULASCH, 2016)
	Etiópia	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Gabão	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Gâmbia	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Gana	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Guiné	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Quênia	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Líbia	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Madagáscar	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Malawi	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Mali	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Marrocos	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)

Região	País	Fonte	
		Participação no Consumo de Termoplásticos	Participação do setor de uso final
OCEÂNIA	Moçambique	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Mauritânia	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Maurício	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Namíbia	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Nigéria	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Nigéria	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Ruanda	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Senegal	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Seicheles	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Tanzânia	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Togo	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Tunísia	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Uganda	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Zâmbia	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
	Zimbábue	(FUHR; FRANKLIN, 2020; GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(FUHR; FRANKLIN, 2020; RYBERG et al., 2018)
Austrália	(O'FARRELL, 2018, 2019, 2020; O'FARRELL; HARNEY; CHAKMA, 2021)	(MIKULASCH, 2016)	

Região	País	Fonte	
		Participação no Consumo de Termoplásticos	Participação do setor de uso final
BRASIL	Nova Zelândia	(CHIARONI-CLARKE et al., 2019)	(CHIARONI-CLARKE et al., 2019)
	Brasil	(ABIPLAST, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021)	(ABIPLAST, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021)
	Belize	(DOLAN, 2012)	(RYBERG et al., 2018)
	Costa Rica	(DOLAN, 2012)	(RYBERG et al., 2018)
	El Salvador	(DOLAN, 2012)	(RYBERG et al., 2018)
	Guatemala	(DOLAN, 2012)	(RYBERG et al., 2018)
AMÉRICA CENTRAL	Honduras	(DOLAN, 2012)	(RYBERG et al., 2018)
	México	(ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA, 2020)	(ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA, 2020)
	Nicarágua	(DOLAN, 2012)	(RYBERG et al., 2018)
	Panamá	(DOLAN, 2012)	(RYBERG et al., 2018)
	Canadá	(UMEOZOR et al., 2021)	(MIKULASCH, 2016)
PAÍSES DO MAR CÁSPIO	Cazaquistão	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Paquistão	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Uzbequistão	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
CHINA	China	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017; JIANG et al., 2020)	(JIANG et al., 2020)
UE + Noruega, Suíça, Reino Unido	Áustria	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Bélgica	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Bulgária	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)

Região	País	Fonte	
		Participação no Consumo de Termoplásticos	Participação do setor de uso final
	Croácia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Chipre	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	República Tcheca	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Dinamarca	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Estônia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	França	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Finlândia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Alemanha	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a,	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a,

Região	País	Fonte	
		Participação no Consumo de Termoplásticos	Participação do setor de uso final
		2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Grécia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Hungria	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Irlanda	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Itália	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Letônia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Lituânia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Luxemburgo	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Malta	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010,	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010,

Região	País	Fonte	
		Participação no Consumo de Termoplásticos	Participação do setor de uso final
		2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Países Baixos	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Noruega	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Polônia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Portugal	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Romênia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Eslováquia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Eslovênia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Espanha	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE,	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE,

Região	País	Fonte	
		Participação no Consumo de Termoplásticos	Participação do setor de uso final
		2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Suécia	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Suíça	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	Turquia	(PAGEV, 2016, 2017)	(PAGEV, 2016, 2017)
	Reino Unido	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)	(PLASCTICSEUROPE, 2021; PLASTICSEUROPE, 2008a, 2008b, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2016, 2018a, 2018b, 2019, 2020)
	ÍNDIA	Índia	(CPMA, 2012, 2013, 2014, 2015, 2019, 2020)
S. COREIA	Coreia do Sul	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
JAPÃO	Japão	(PWMI, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022)	(PWMI, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022)
ORIENTE MÉDIO	Bahrein	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)
	Irã	(GPCA, 2014b)	(MIKULASCH, 2016)
	Iraque	(GPCA, 2014b)	(MIKULASCH, 2016)
	Israel	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Jordânia	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Kuaite	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)
	Líbano	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Omã	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)

Região	País	Fonte	
		Participação no Consumo de Termoplásticos	Participação do setor de uso final
OUTROS ÁSIA	Catar	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)
	Arábia Saudita	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)
	Síria	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Emirados Árabes Unidos	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)	(GPCA 2014; 2015; 2016; 2017)
	Iêmen	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Indonésia	(VPA, 2016)	(MIKULASCH, 2016)
	Malásia	(VPA, 2016)	(MIKULASCH, 2016)
	Filipinas	(PPIA, 2014)	(RYBERG et al., 2018)
	Tailândia	(VPA, 2016)	(MIKULASCH, 2016)
	Taiwan	(VPA, 2016)	(MIKULASCH, 2016)
RÚSSIA	Vietname	(VPA, 2016)	(MIKULASCH, 2016)
	Rússia	(DAUTOVA, 2017)	(NIKOLAENVA, 2010)
ÁFRICA DO SUL	África do Sul	(PLASTICS SA, 2014)	(PLASTICS SA, 2014)
	Argentina	(CAIP, 2015)	(CAIP, 2015; MIKULASCH, 2016)
AMÉRICA DO SUL	Chile	(ASIPLA, 2019, 2020)	(ASIPLA, 2019, 2020; MIKULASCH, 2016)
	Colômbia	(ACOPLÁSTICOS, 2020, 2022)	(ACOPLÁSTICOS, 2020, 2022; MIKULASCH, 2016)
	Equador	(CÂMARA DE INDUSTRIAS DE GUAYAQUIL, 2018)	(RYBERG et al., 2018)
	Peru	(ACOPLÁSTICOS, 2020, 2022)	(MIKULASCH, 2016)
EUA	EUA	(HELLER; MAZOR; KEOLEIAN, 2020)	(HELLER; MAZOR; KEOLEIAN, 2020)
LESTE EUROPEU	Sérvia e Montenegro	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)
	Ucrânia	(GEYER; JAMBECK; LAW, 2017)	(MIKULASCH, 2016)

I.2 Matrizes de conversão dos produtos da cadeia petroquímica

As próximas tabelas apresentam as matrizes de conversão entre os diversos níveis de produtos e químicos básicos utilizados nas estimativas destes últimos.

Tabela A 2 – Matriz de Conversão Produtos Terciários x Produtos Secundários

		Produtos Secundários [kgPS/kgPT]							
		Nitrato de Amônio	Hexametilenodiamina	Ácido Adípico	Metil Metacrilato [MMA]	Caprolactama	Anilina	Bisferol A	Acetato de Vinila
Produtos Terciários	Nitrato de Amônio e Ureia [UAN]	0.48							
	Nitrato de Amônio e Cálcio [CAN]	0.77							
	Poliamida (<i>poliamida 6</i>)					1.02			
	Poliamida (<i>poliamida 6 - fibra</i>)					1.02			
	Poliamida (<i>poliamida 66</i>)		0.52	0.66					
	Poliamida (<i>poliamida 66 - fibra</i>)		0.52	0.66					
	Polimetilmetacrilato [PMMA]				1.02				
	Acetato de Polivinila [PVAc]								1.02
	Polycarbonato							0.91	
	Metileno Difenil Diisocianato [MDI]						0.92		

Tabela A 3 - Matriz de Conversão Produtos Terciários x Produtos Primários

		Produtos Primários [kgPP/kgPT]	
		Ureia	Formaldeído
Produtos Terciários	Nitrato de Amônio e Ureia [UAN]	0.34	
	Metileno Difenil Diisocianato [MDI]		0.15

Tabela A 4 - Matriz de Conversão Produtos Secundários x Produtos Primários

		Produtos Primários [kgPP/kgPS]													
		Ureia	Ácido Nítrico	Cloreto de Vímila	Estireno	Monoetilenoglicol [MEG]	Ácido Tereftálico	Adiponitrila	Álcool 2-etil-hexil	Anidrido Ftálico	Acilonitrila	Ciclohexano	Ácido Acético	Acetona	Fenol
Produtos Secundários	Nitrato de Amônio		0.80												
	Cloreto de Polivinila [PVC]			1.03											
	Poliestireno (<i>expansível</i>)				1.02										
	Poliestireno (<i>alto impacto</i>)				1.05										
	Poliestireno (<i>aplicação geral</i>)				1.02										

		Produtos Primários [kgPP/kgPS]												
		Ureia	Ácido Nítrico	Cloro de Vinila	Estireno	Monoetilenglicol [MEG]	Ácido Tereftálico	Adiponitrila	Álcool 2-etil-hexil	Anidrido Ftálico	Acrilonitrila	Ciclohexano	Ácido Acético	Acetona
	Polietileno Tereftalato [PET]				0.34	0.87								
	Hexametilendiamina						1.10							
	Ácido Adípico		0.54								0.72			
	Diocetil Ftalato [DOP]							0.69	0.39					
	Metil Metacrilato [MMA]												0.72	
	Caprolactama										1.03			
	Anilina		0.71											
	Bisfenol A												0.29	0.88
	Acetato de Vinila											0.73		
	Estireno Acrilonitrilo [SAN]				0.79					0.26				
	Acrilonitrila Butadieno Estireno [ABS]				0.56					0.26				
	Melamina	1.504												
	Nitrilo Butadieno [NBR]									0.36				
	Policarilonitrila [PAN]									1.02				
	Estireno Butadieno [SBR]				0.26									
	Tolueno Diisocianato [TDI]		0.89											

Tabela A 5 - Matriz de Conversão Produtos Secundários x Químicos Básicos

		Químicos Básicos [kgQB/kgPS]					
		Metanol	Amônia	Etileno	Butadieno	Benzeno	Tolueno
Produtos Secundários	Nitrato de Amônio		0.22				
	Metil Metacrilato [MMA]	0.40	0.21				
	Caprolactama		0.42				
	Anilina					0.88	
	Acetato de Vinila			0.33			
	Acrilonitrila Butadieno Estireno [ABS]				0.20		
	Nitrilo Butadieno [NBR]				0.66		
	Estireno Butadieno [SBR]				0.77		
	Tolueno Diisocianato [TDI]						0.65

Tabela A 6 - Matriz de Conversão Produtos Primários x Químicos Básicos

		Químicos Básicos [kgQB/kgPP]												
		Metanol	Amônia	Etileno	Propileno	Butadieno	Isobuteno	Butano	Benzeno	o-Xileno	m-Xileno	p-Xileno		
Produtos Primários	Ureia		0.58											
	Fosfato Diamônico [DAP]		0.32											
	Fosfato Monoamônico [MAP]		0.21											
	Sulfato de Amônio		0.26											
	Ácido Nítrico		0.29											
	Polietileno (HDPE)			1.05										
	Polietileno (LDPE)			1.03										
	Cloreto de Vinila			0.49										
	Polipropileno [PP]				1.02									
	Estireno			0.283					0.79					
	Monoetilenoglicol [MEG]			0.60										
	Ácido Tereftálico												0.67	
	Ácido Isoftálico											0.67		
	Dimetil Tereftalato	0.39												0.64
	Adiponitrila		0.33			0.53								
	Álcool 2-etil-hexil				0.80									
	Anidrido Ftálico									0.96				
	Acrilonitrila		0.45		1.10									
Ciclohexano								0.94						

		Químicos Básicos [kgQB/kgPP]										
		Metanol	Amônia	Etileno	Propileno	Butadieno	Isobuteno	Butano	Benzeno	o-Xileno	m-Xileno	p-Xileno
	Ácido Acético	0.54										
	Formaldeído	1.14										
	Acetona				0.81			1.58				
	Fenol				0.49			0.95				
	Óxido de Propileno				0.85							
	Anidrido Maleico						0.85	0.09				
	Metil Tert Butil Éter [MTBE]	0.37					0.65					
	Polibutadieno [BR]					1.02						
	Cloropreno					0.62						

I.3 Referências

ABIPLAST. **Perfil 2014**. São Paulo: 2015.

ABIPLAST. **Perfil 2015**. São Paulo: 2016.

ABIPLAST. **Perfil 2016 - Edição Especial**. São Paulo: 2017.

ABIPLAST. **Perfil 2017**. São Paulo: 2018.

ABIPLAST. **Perfil 2018**. São Paulo: 2019

ABIPLAST. **Perfil 2019**. São Paulo: 2020.

ABIPLAST. **Perfil 2020**. São Paulo: 2021.

ACOPLÁSTICOS. **Plásticos en Colombia - 2019/2020**. Bogotá: 2019.

ACOPLÁSTICOS. **Plásticos en Colombia - 2021/2022**. Bogotá: 2020.

ASIPLA. **ESTADÍSTICAS INDUSTRIA DEL PLÁSTICO - INFORME 2019**.
Santiago: 2019

ASIPLA. **ESTADÍSTICAS INDUSTRIA DEL PLÁSTICO - INFORME 2020**.
Santiago: 2020.

ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA, A. C. **Anuario Estadístico de la Industria Química**. Disponível em: <<https://aniq.org.mx/webpublico/notas/anuarioestadisticoiq.asp>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

CAIP. **Anuario Estadístico de la Industria Plástica - Actualización 2015**. 2015.

CÂMARA DE INDUSTRIAS DE GUAYAQUIL. **Estudio Sectorial - Plásticos**.
Guayaquil: 2018.

CHIARONI-CLARKE, R. et al. **Rethinking Plastics in Aotearoa New Zealand - Full Report**. Auckland: 2019.

CPMA. **INDIAN PETROCHEMICAL INDUSTRY - Country Paper & Committee Presentations**. New Delhi: 2012.

CPMA. **Indian Petrochemical Industry - Review of 2012 & Outlook for 2013**. New Delhi: 2013.

CPMA. **INDIAN PETROCHEMICAL INDUSTRY - Country Paper From India**. New Delhi: 2014.

CPMA. **INDIAN PETROCHEMICAL INDUSTRY - Country Paper From India**. New Delhi: 2015.

CPMA. **INDIAN PETROCHEMICAL INDUSTRY - Country Paper From India**. New Delhi: 2019.

CPMA. **INDIAN PETROCHEMICAL INDUSTRY - Country Paper From India**. New Delhi: 2020.

DAUTOVA, A. **Polymer industry: rebalancing**. Disponível em: <<https://rupec.ru/download.php?url=%2Fupload%2Fiblock%2F4e1%2F4e1b12d6f4020b242de320acf18a4e1a.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

DOLAN, M. **Central America polymer imports to increase**. Disponível em: <<https://www.icis.com/explore/resources/news/2012/06/01/9566063/central-america-polymer-imports-to-increase/>>. Acesso em: 12 ago. 2023.

FUHR, L.; FRANKLIN, M. **PLASTIC ATLAS - Facts and figures about the world of synthetic polymers - Nigeria Edition**. Abuja: 2020.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. “Production, use, and fate of all plastics ever made”. **Science Advances**, v .3, 2017.

GPCA. **GCC Plastics Industry Indicators 2013**. Dubai: 2014.

GPCA. **A New Horizon for the GCC Plastic Processing Industry**. Dubai: 2014.

GPCA. **GCC Plastic Industry Indicators 2014**. Dubai: 2015.

GPCA. **GCC Plastics Industry Indicators 2015**. Dubai: 2016.

GPCA. **GCC Plastics Industry Indicators 2016**. Dubai: 2017.

HELLER, M. C.; MAZOR, M. H.; KEOLEIAN, G. A. “Plastics in the US: Toward a material flow characterization of production, markets and end of life”. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 9, 1 set. 2020.

JIANG, X. et al. “Assessment of Plastic Stocks and Flows in China: 1978-2017”. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, 1 out. 2020.

MIKULASCH, F. **2009-2020 Country Cluster Plastics Resin Production and Consumption in 63 Countries Worldwide**. Frankfurt am Main: 2016.

NIKOLAENVA, K. T. **Polymeric Products Market: Arguments and Facts**. Disponível em: <https://rupec.ru/download.php?url=%2Fupload%2Fiblock%2F479%2F479c5d1efd975828bc3c1a6a21727db1.ppt>. Acesso em: 12 ago. 2023.

O’FARRELL, K. **2016-17 Australian Plastics Recycling Survey - National report**. 2018.

O’FARRELL, K. **2017-18 Australian Plastics Recycling Survey - National Report**. 2019.

O'FARRELL, K. **2018-19 Australian Plastics Recycling Survey - National report.** 2020.

O'FARRELL, K.; HARNEY, F.; CHAKMA, P. **Australian Plastics Flows and Fates Study 2019-20 - National report.** 2021.

PAGEV. **WORLD & TURKISH PLASTICS INDUSTRY REPORT.** Istanbul: 2016.

PAGEV. **Turkish Plastics Industry Follow-Up Report - 2017.** Istanbul: 2017.

PLASCTICSEUROPE. **Plastics - the Facts 2021 - An analysis of European plastics production, demand and waste data.** Brussels: 2021.

PLASTICS SA. **Overview of the Plastics Industry in South Africa.** Johannesburg: 2014.

PLASTICSEUROPE. **The Compelling Facts About Plastics - An analysis of plastics production, demand and recovery for 2006 in Europe.** Brussels: 2008.

PLASTICSEUROPE. **The Compelling Facts About Plastics 2007 - An analysis of plastics production, demand and recovery for 2007 in Europe.** Brussels: 2009.

PLASTICSEUROPE. **The Compelling Facts About Plastics 2009 - An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2008.** Brussels: 2010.

PLASTICSEUROPE. **Plastics - the Facts 2010 - An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2009.** Brussels: 2011.

PLASTICSEUROPE. **Plastics - the Facts 2011 - An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2010.** Brussels: 2012.

PLASTICSEUROPE. **Plastics - the Facts 2012 - An analysis of European plastics production, demand and recovery for 2011.** Brussels: 2013.

PLASTICSEUROPE. Plastics - the Facts 2013 - An analysis of European latest plastics production, demand and waste data. Brussels: 2014.

PLASTICSEUROPE. Plastics - the Facts 2014/2015 - An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: 2015.

PLASTICSEUROPE. Plastics - the Facts 2015 - An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: 2016.

PLASTICSEUROPE. Plastics - the Facts 2016 - An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: 2017.

PLASTICSEUROPE. Plastics - the Facts 2017 - An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: 2018.

PLASTICSEUROPE. Plastics - the Facts 2018 - An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: 2019.

PLASTICSEUROPE. Plastics - the Facts 2019 - An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: 2020.

PLASTICSEUROPE. Plastics - the Facts 2020 - An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels: 2020.

PLASTINDIA FOUNDATION. Report on Indian Plastic Industry - 2012 - 2016. Mumbai: 2013.

PPIA. Philippine Country Report. 2014.

PWMI. Plastic Products,Plastic Waste and Resource Recovery [2006]. Tokyo: 2008.

PWMI. Plastic Products,Plastic Waste and Resource Recovery [2007]. Tokyo: 2009.

PWMI. Plastic Products,Plastic Waste and Resource Recovery [2008]. Tokyo: 2010.

PWMI. **Plastic Products,Plastic Waste and Resource Recovery[2009]**. Tokyo: 2011.

PWMI. **Plastic Products,Plastic Waste and Resource Recovery [2010]**. Tokyo: 2012.

PWMI. **Plastic Products,Plastic Waste and Resource Recovery [2011]**. Tokyo: 2013.

PWMI. **Plastic Products,Plastic Waste and Resource Recovery [2012]**. Tokyo: 2014.

PWMI. **Plastic Products, Plastic Waste and Resource Recovery [2013]**. Tokyo: 2015.

PWMI. **Plastic Products,Plastic Waste and Resource Recovery [2014]**. Tokyo: 2016.

PWMI. **Plastic Products, Plastic Waste and Resource Recovery [2015]**. Tokyo: 2017.

PWMI. **Plastic Products, Plastic Waste and Resource Recovery [2016]**. Tokyo: 2018.

PWMI. **Plastic Products, Plastic Waste and Resource Recovery [2017]**. Tokyo: 2019.

PWMI. **Plastic Products, Plastic Waste and Resource Recovery [2018]**. Tokyo: 2020.

PWMI. **Plastic Products, Plastic Waste and Resource Recovery [2019]**. Tokyo: 2021.

PWMI. **Plastic Products, Plastic Waste and Resource Recovery [2020]**. Tokyo: 2022.

RYBERG, M. W. et al. **Mapping of global plastics value chain and plastics losses to the environment - With a particular focus on marine environment**. Nairobi: 2018.

UMEZOR, E. et al. **Towards a Circular Economy of Plastic Products in Canada**. Calgari: [s.n.]. Disponível em: <https://ceri.ca/assets/files/Study_194_Full_Report.pdf>.

VPA. **Industry overview**. 2021.

YAHIA, I. **Overview on Egyptian Petrochemicals Market**. Abu Dhabi, maio 2013.

ANEXO II Resultados Adicionais

II.1 IMP-Ren

As próximas figuras apresentam os resultados de Demanda total não-energética de Carvão Mineral para o setor petroquímico, bem como as demandas para os três energéticos fósseis agrupadas por aplicação, setor de uso final (para produção de termoplásticos) e por químico básico para o IMP-Ren.

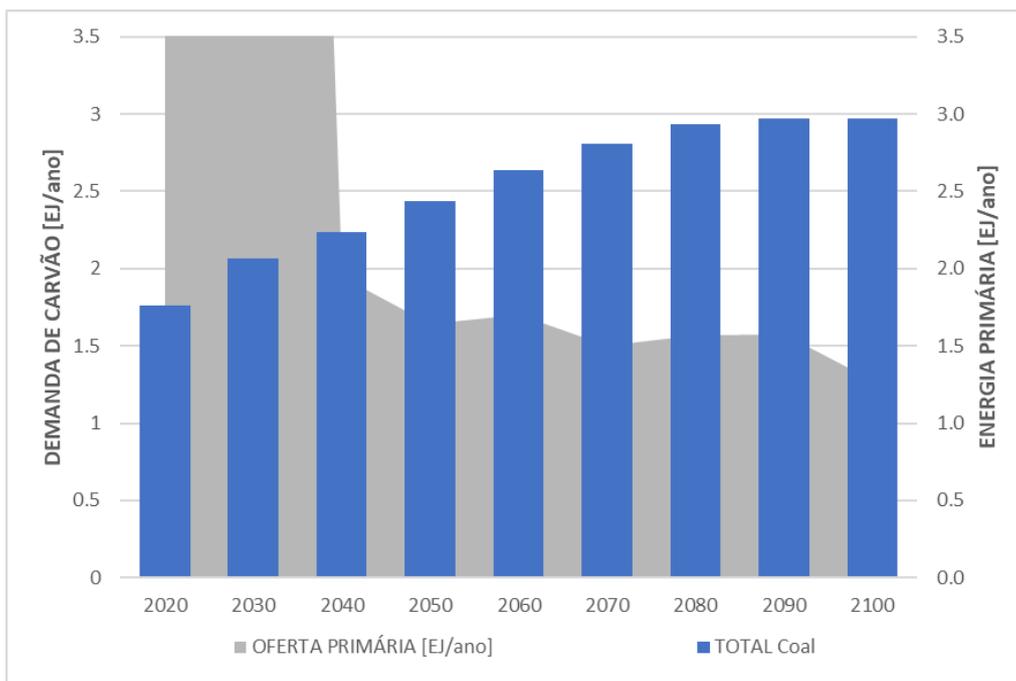


Figura A 1 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

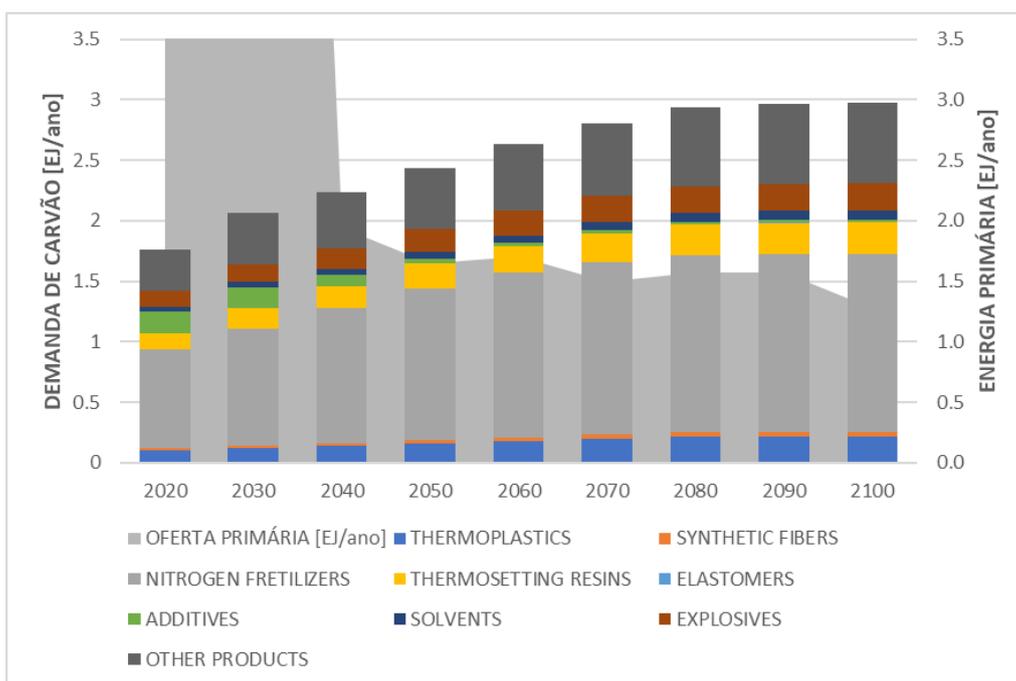


Figura A 2 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por aplicação– IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

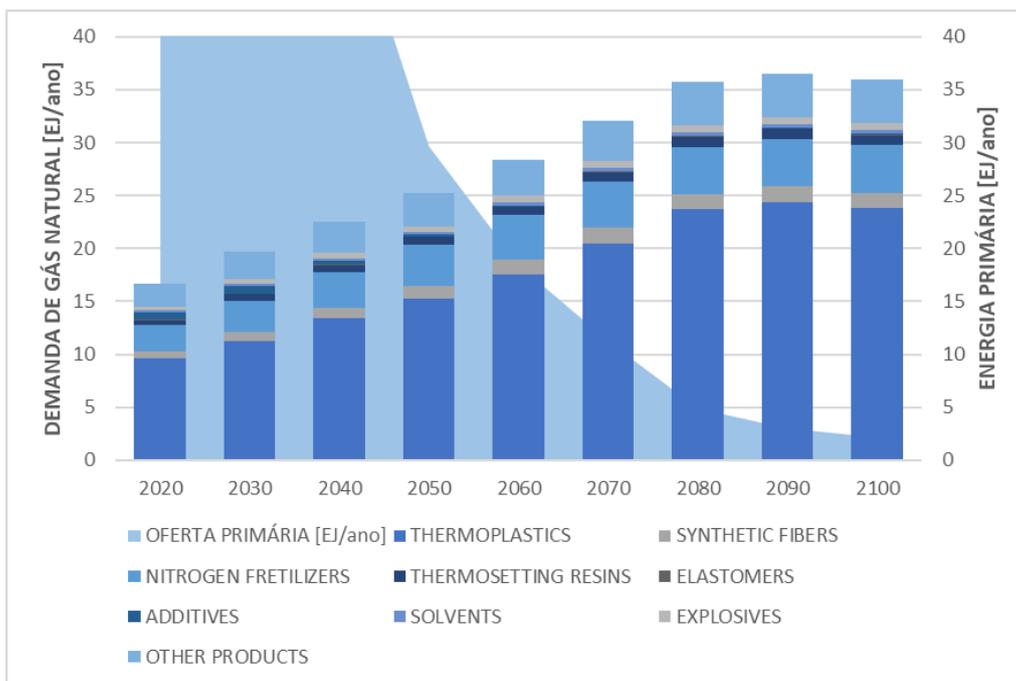


Figura A 3 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por aplicação– IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

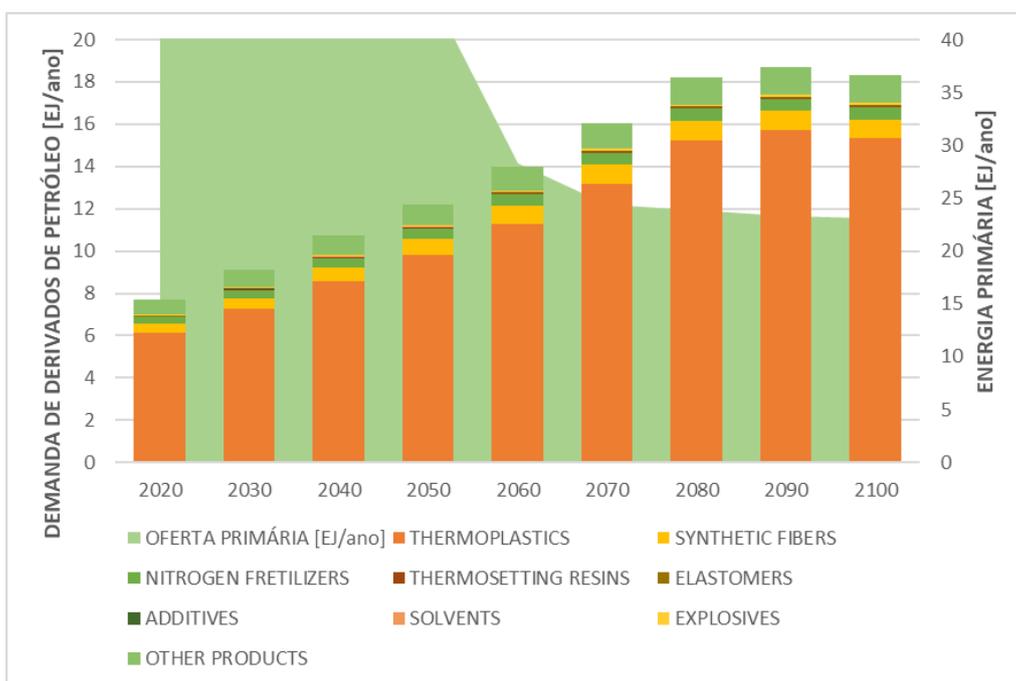


Figura A 4 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por aplicação– IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

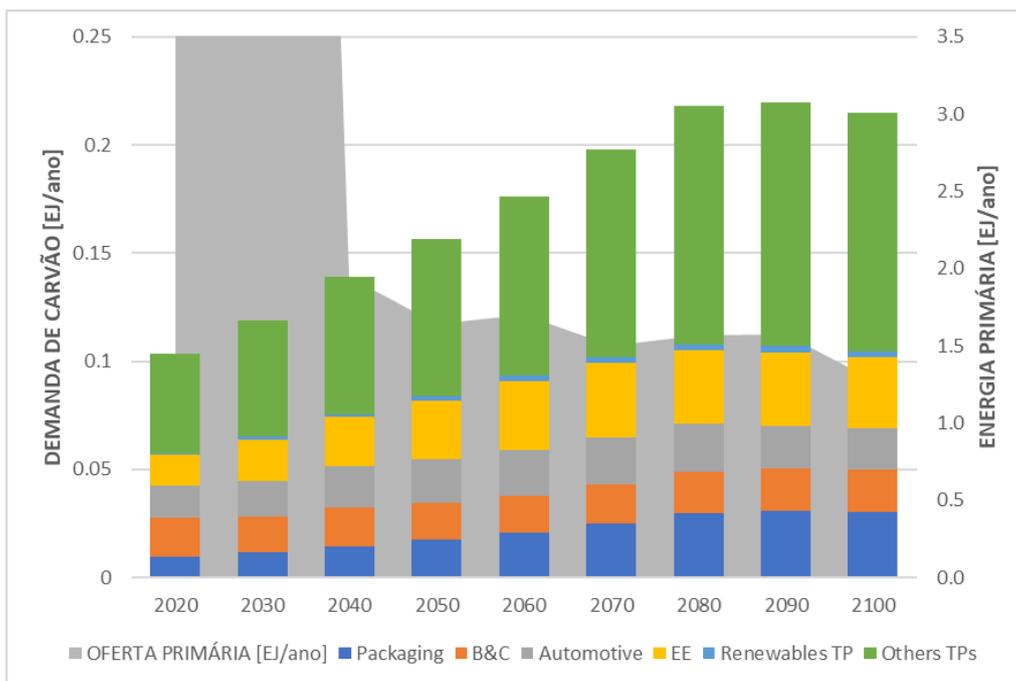


Figura A 5 – Demanda não-energética de carvão mineral para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

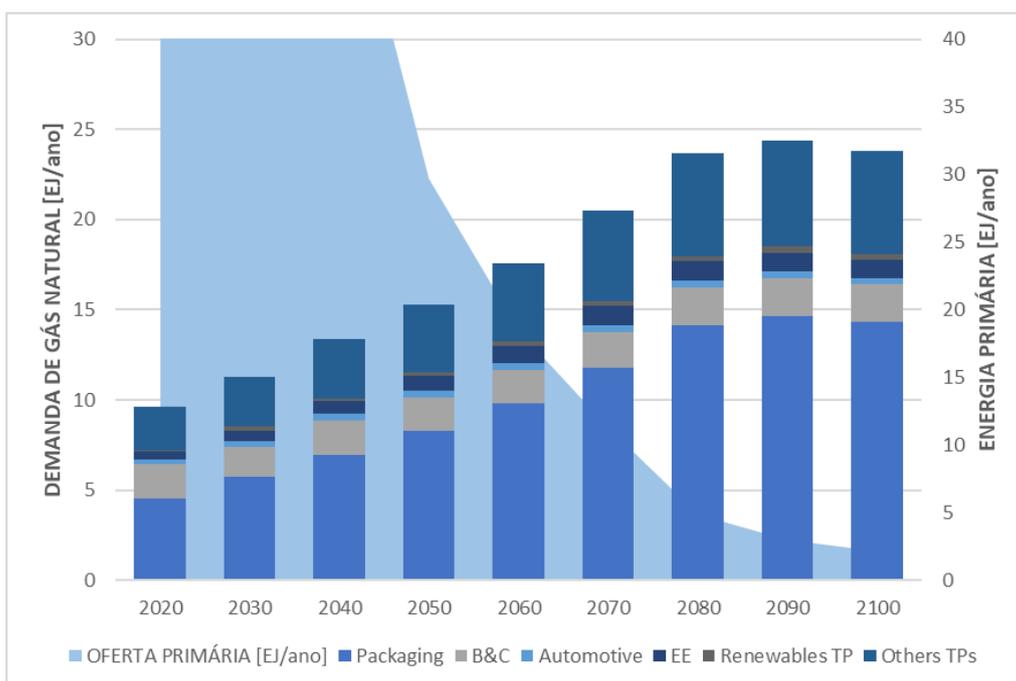


Figura A 6 – Demanda não-energética de gás natural para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

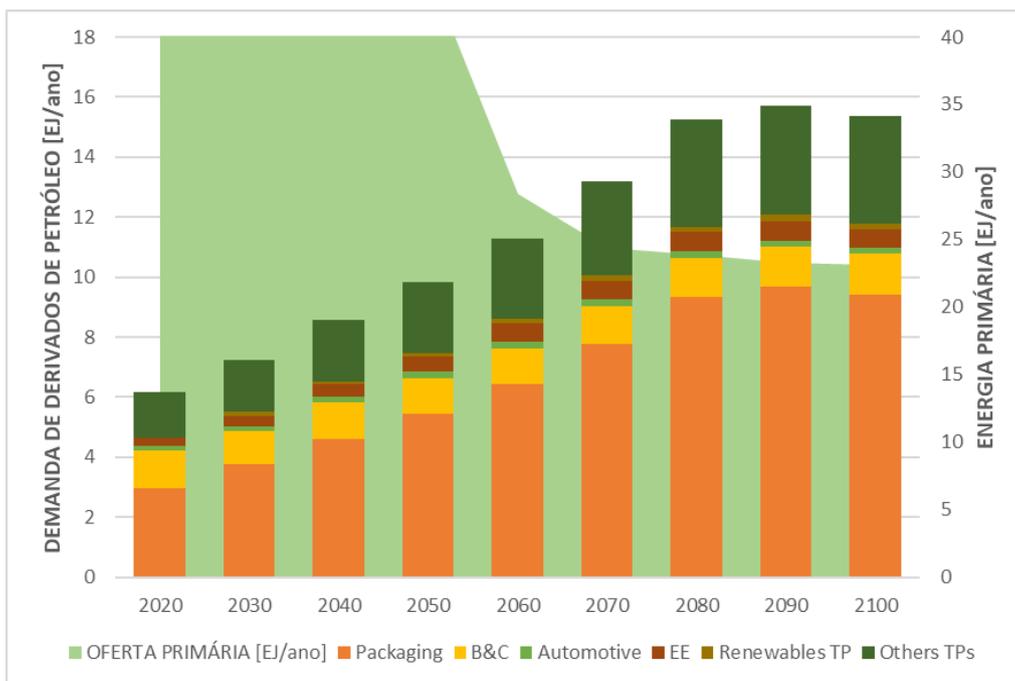


Figura A 7 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

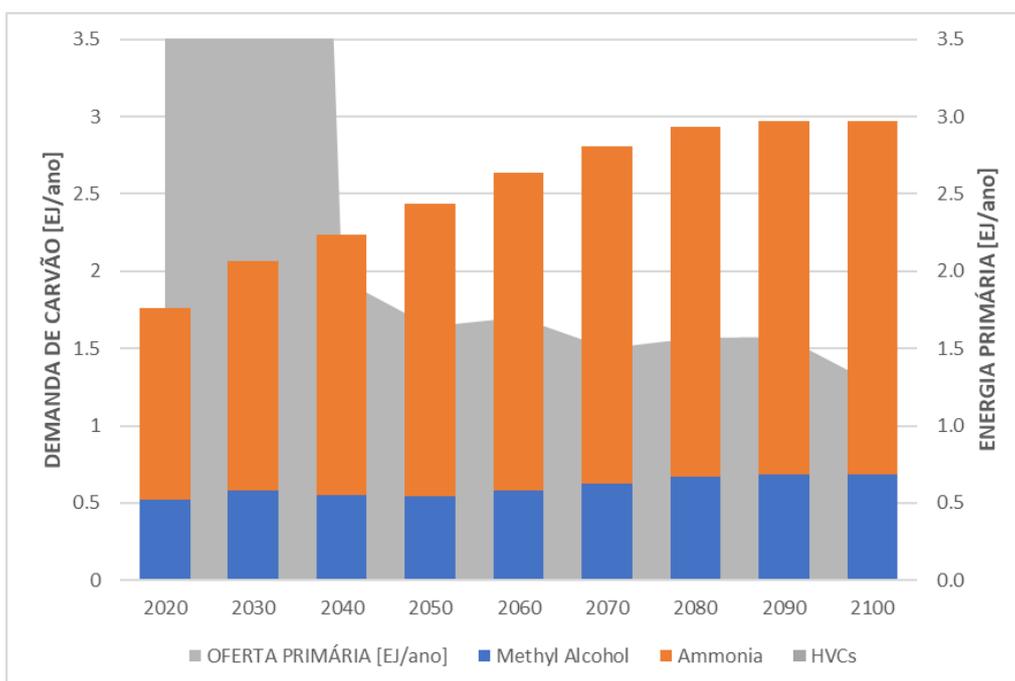


Figura A 8 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por químico básico – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

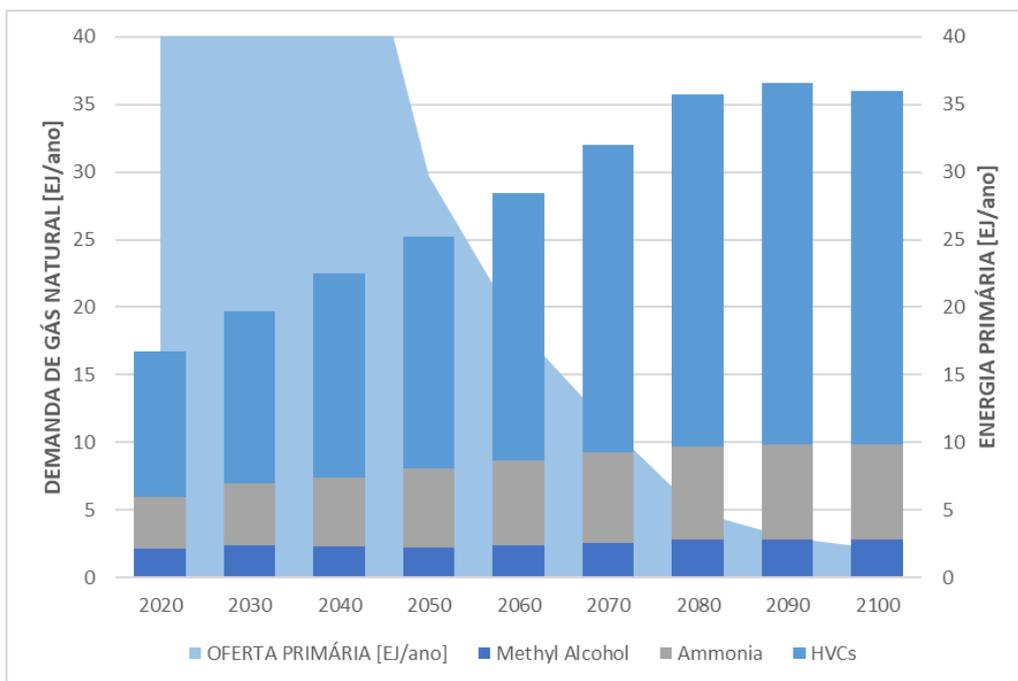


Figura A 9 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por químico básico – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

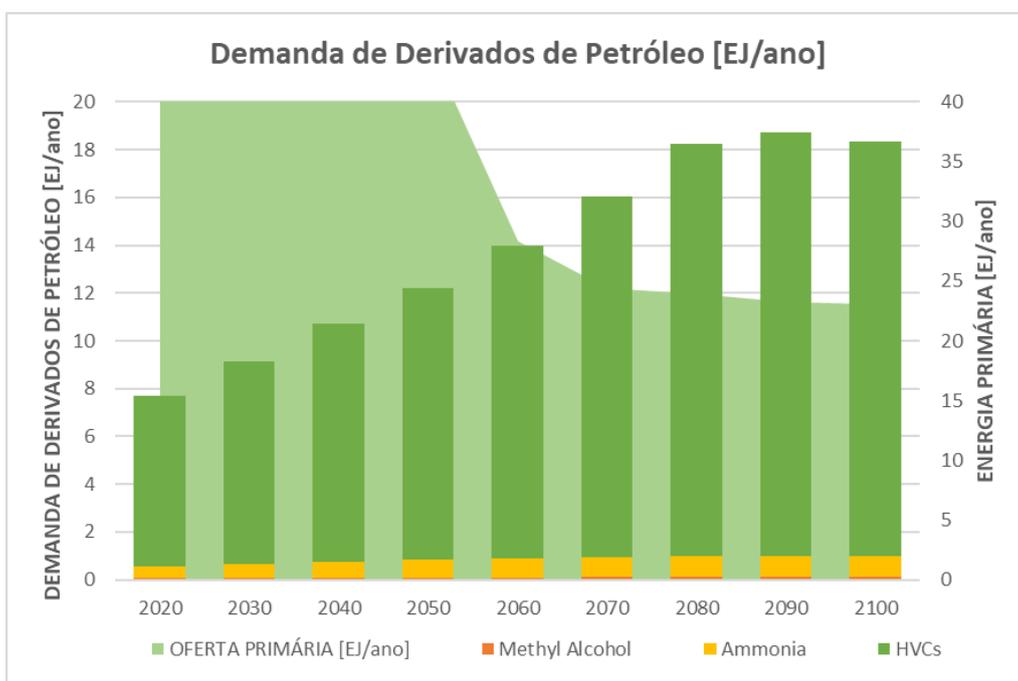


Figura A 10 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por químico básico – IMP-Ren

Fonte: Elaboração própria

II.2 IMP-LD

As próximas figuras apresentam os resultados de Demanda total não-energética de Carvão Mineral para o setor petroquímico, bem como as demandas para os três energéticos fósseis agrupadas por aplicação, setor de uso final (para produção de termoplásticos) e por químico básico para o IMP-LD.

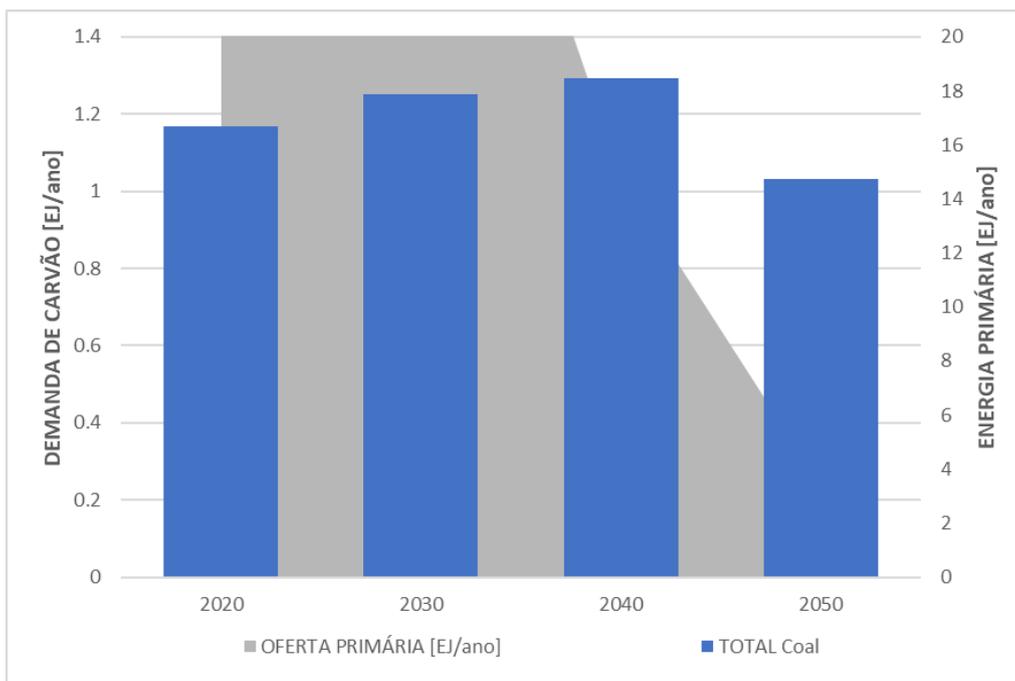


Figura A 11 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

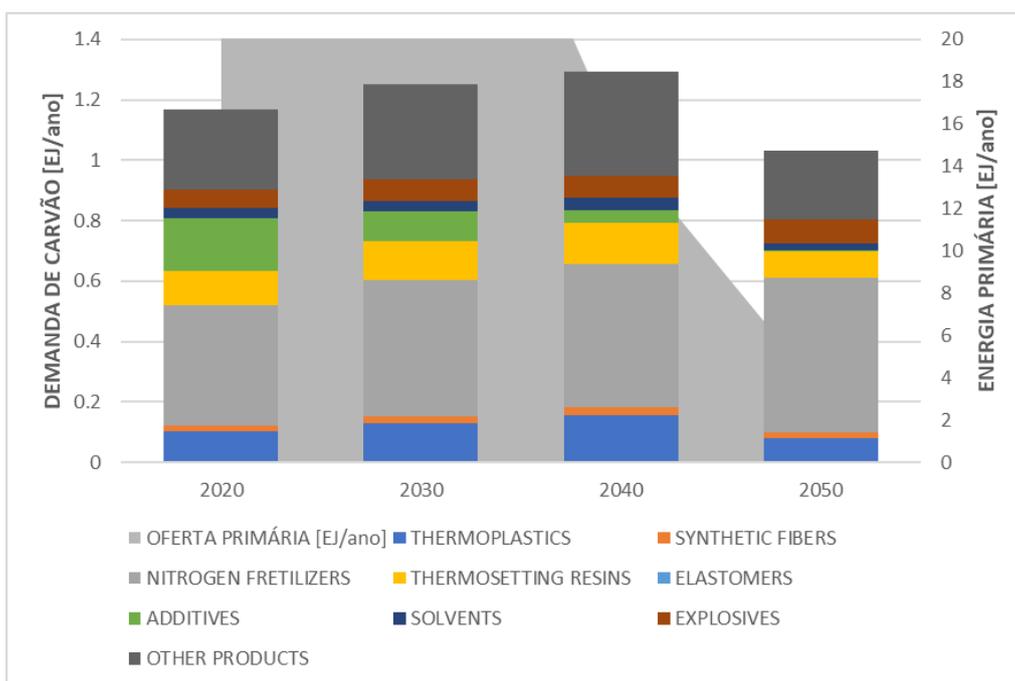


Figura A 12 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por aplicação– IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

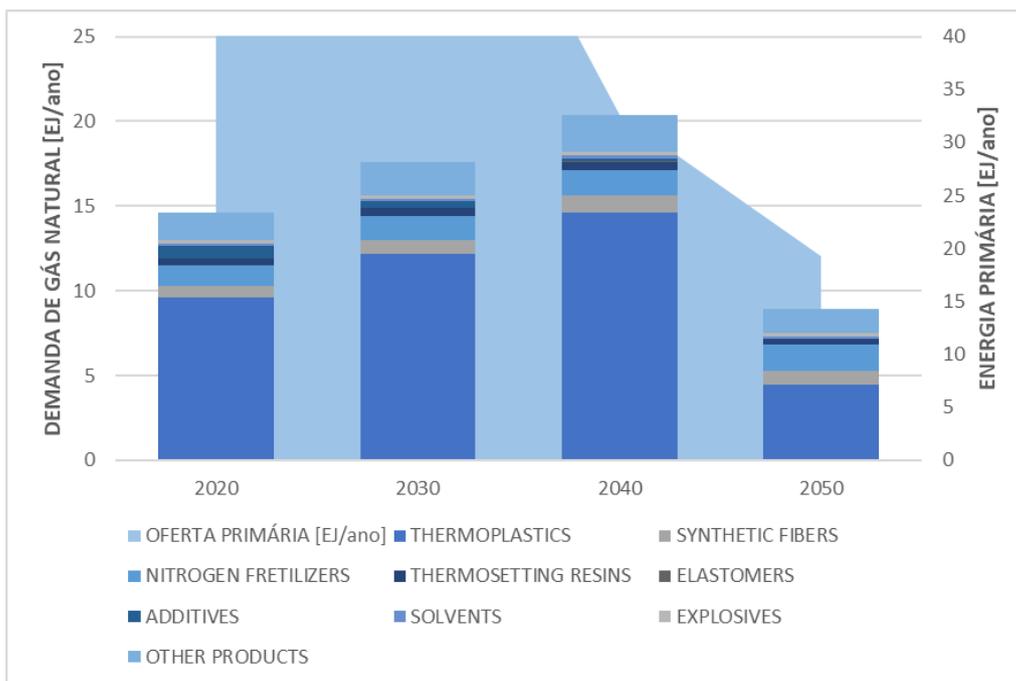


Figura A 13 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por aplicação– IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

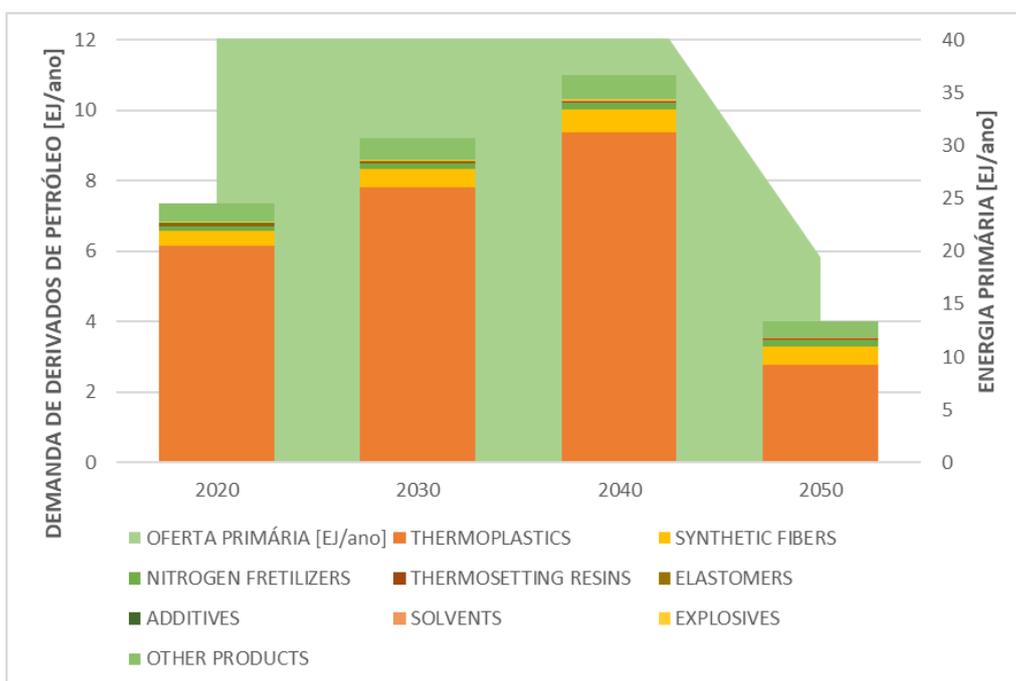


Figura A 14 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por aplicação– IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

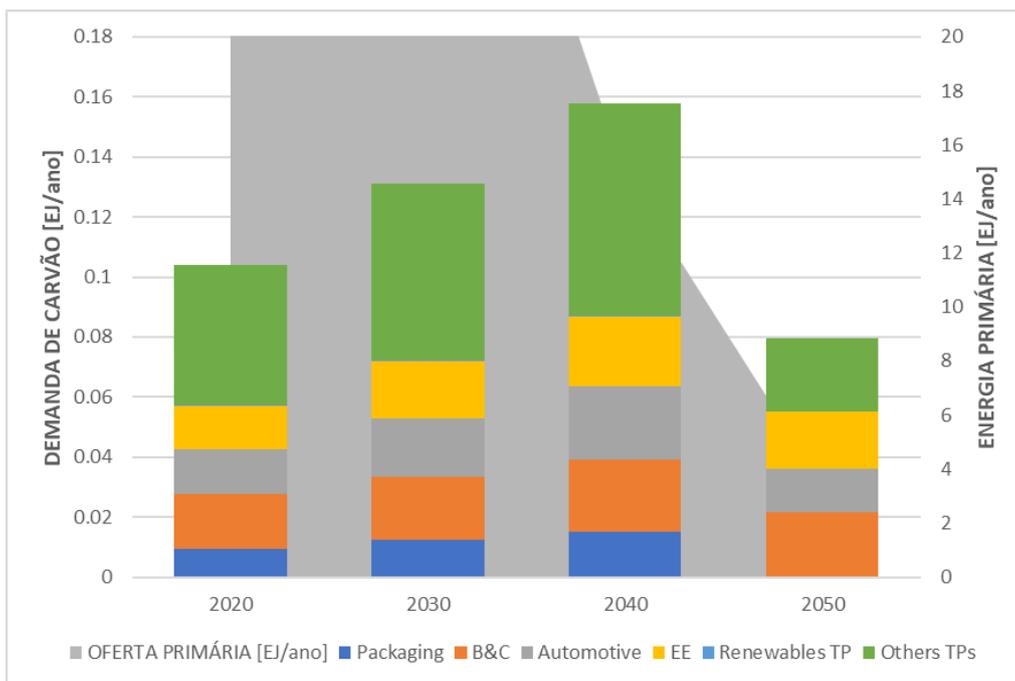


Figura A 15 – Demanda não-energética de carvão mineral para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

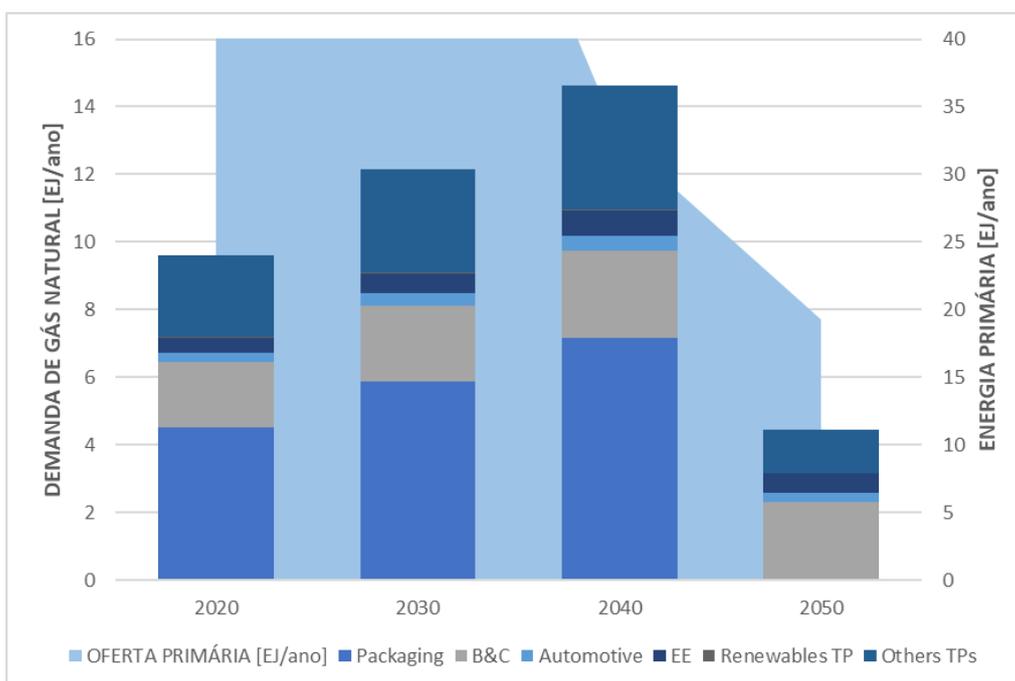


Figura A 16 – Demanda não-energética de gás natural para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

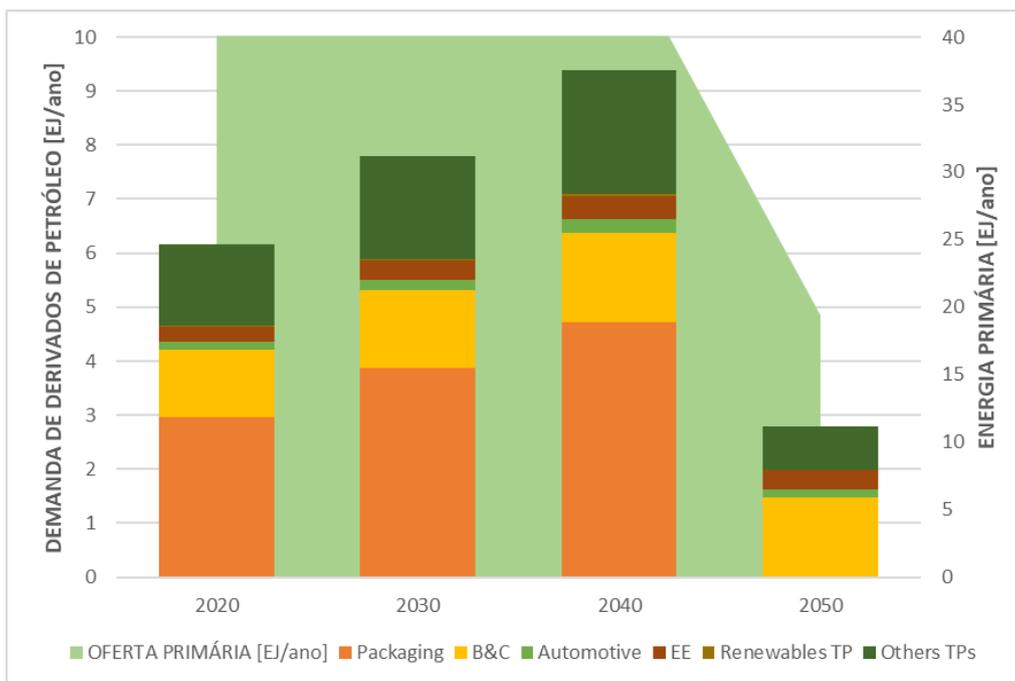


Figura A 17 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

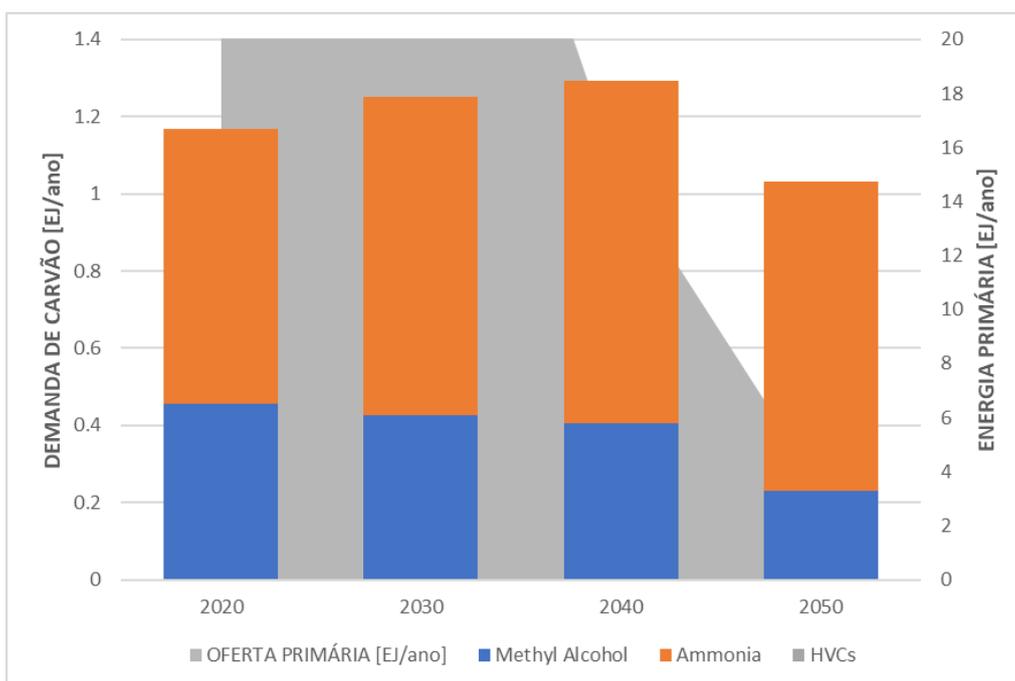


Figura A 18 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por químico básico – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

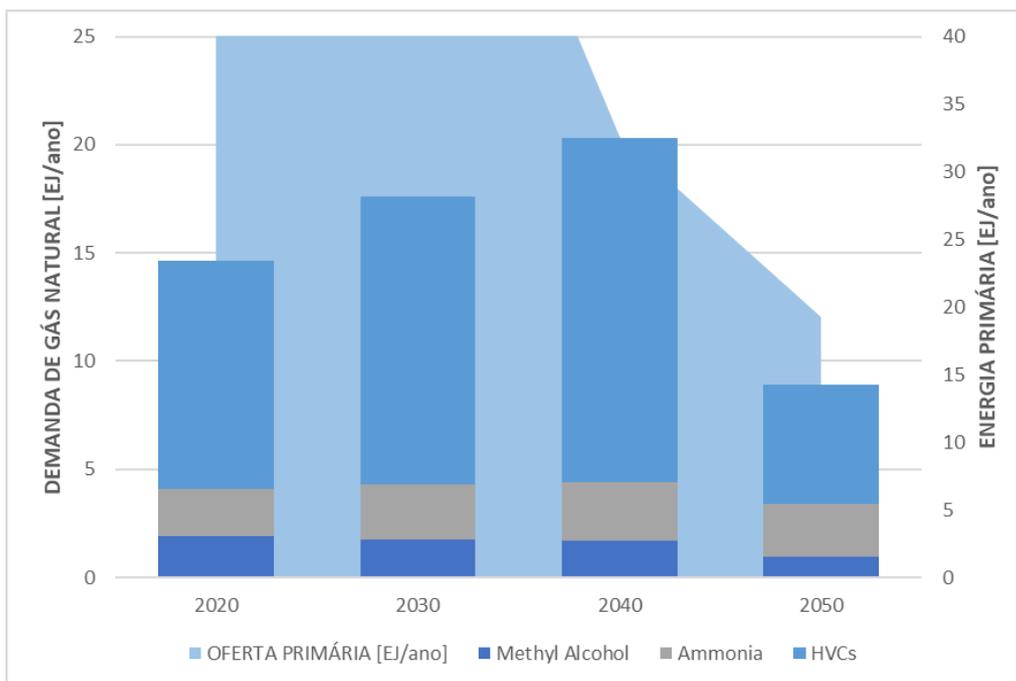


Figura A 19 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por químico básico – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

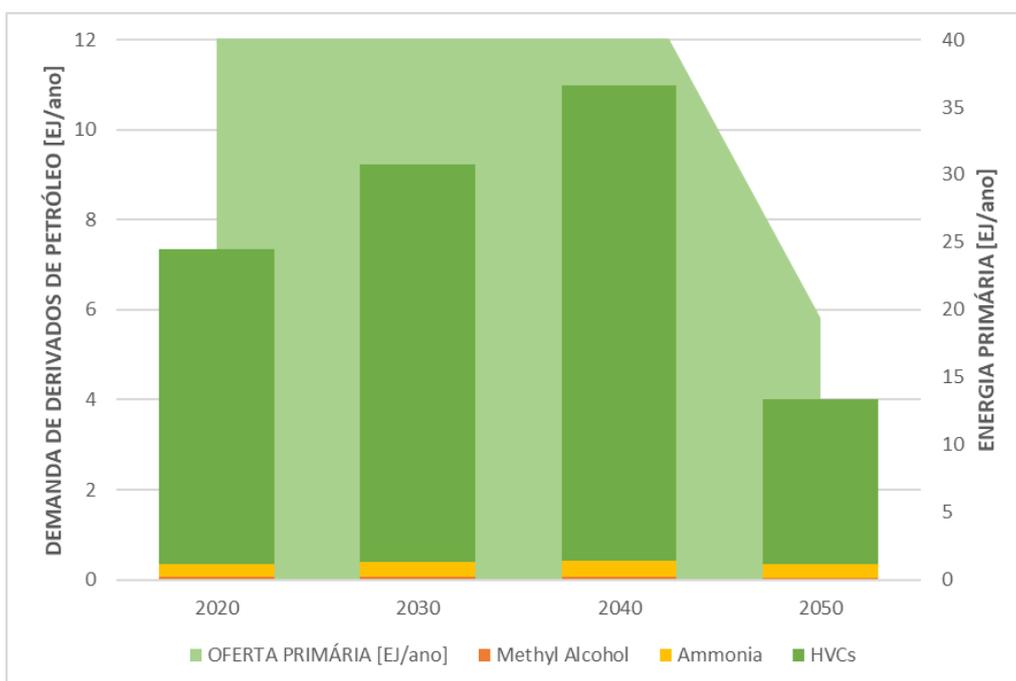


Figura A 20 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por químico básico – IMP-LD

Fonte: Elaboração própria

II.3 IMP-Neg

As próximas figuras apresentam os resultados de Demanda total não-energética de Carvão Mineral para o setor petroquímico, bem como as demandas para os três energéticos fósseis agrupadas por aplicação, setor de uso final (para produção de termoplásticos) e por químico básico para o IMP-Neg.

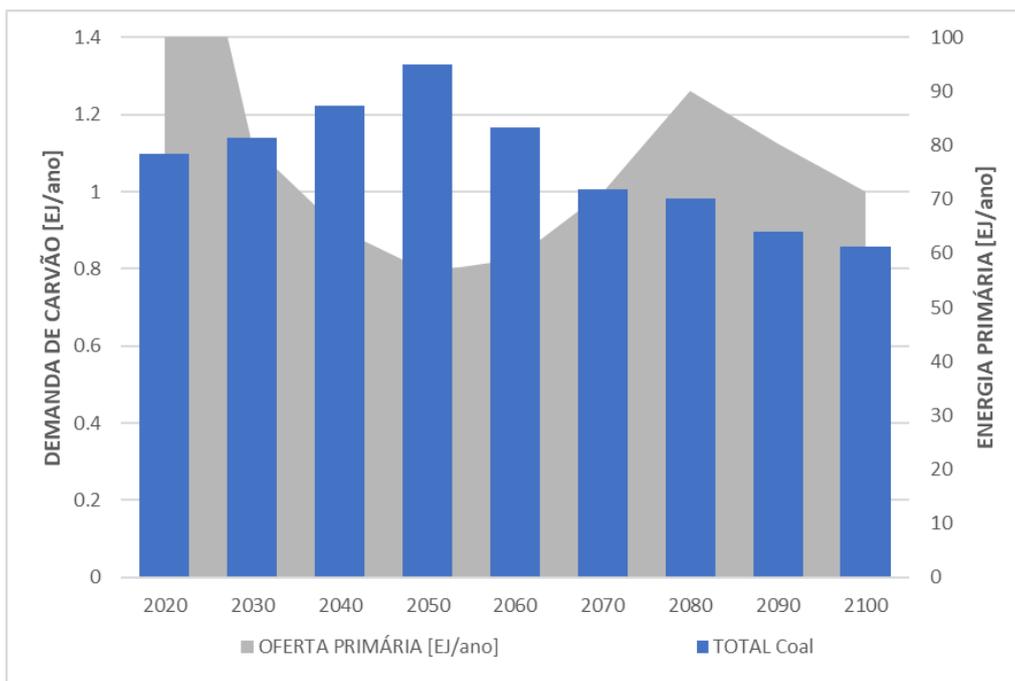


Figura A 21 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico – IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

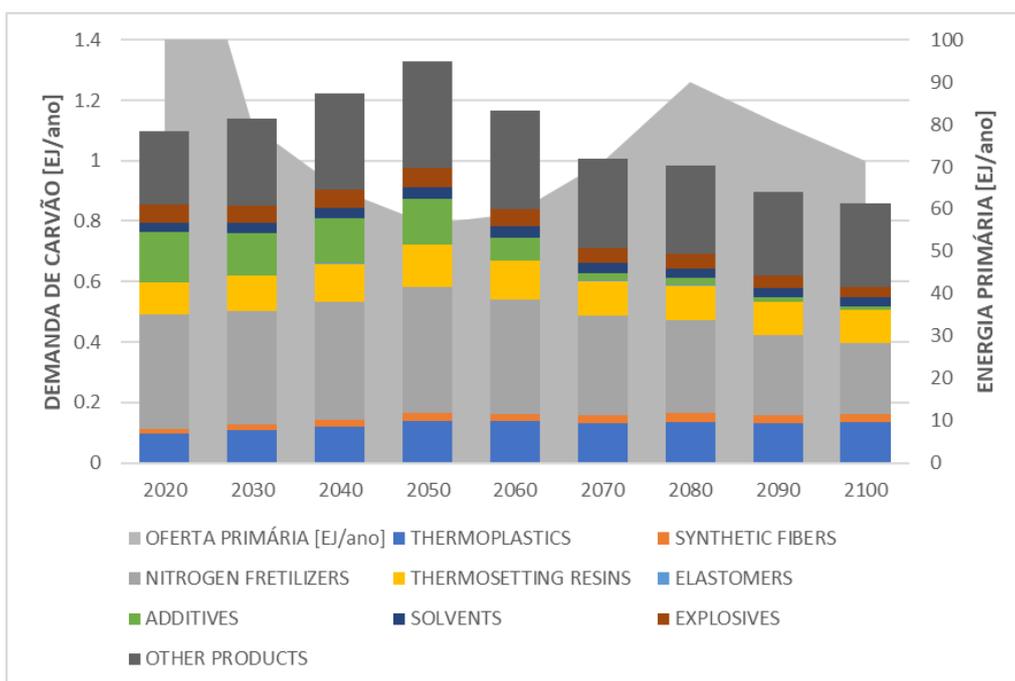


Figura A 22 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por aplicação– IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

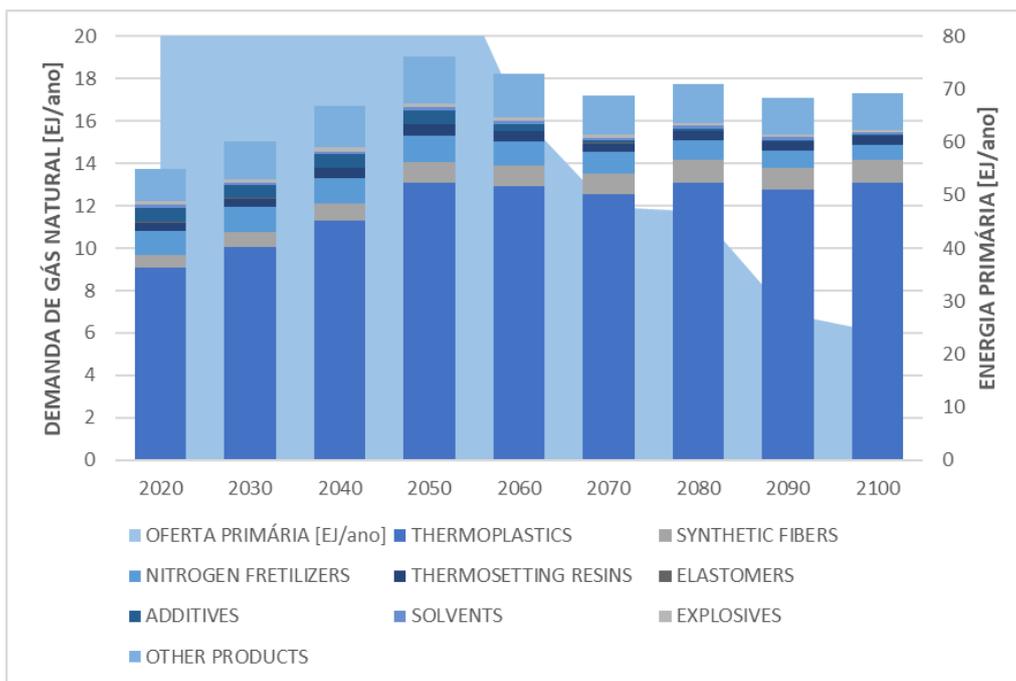


Figura A 23 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por aplicação– IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

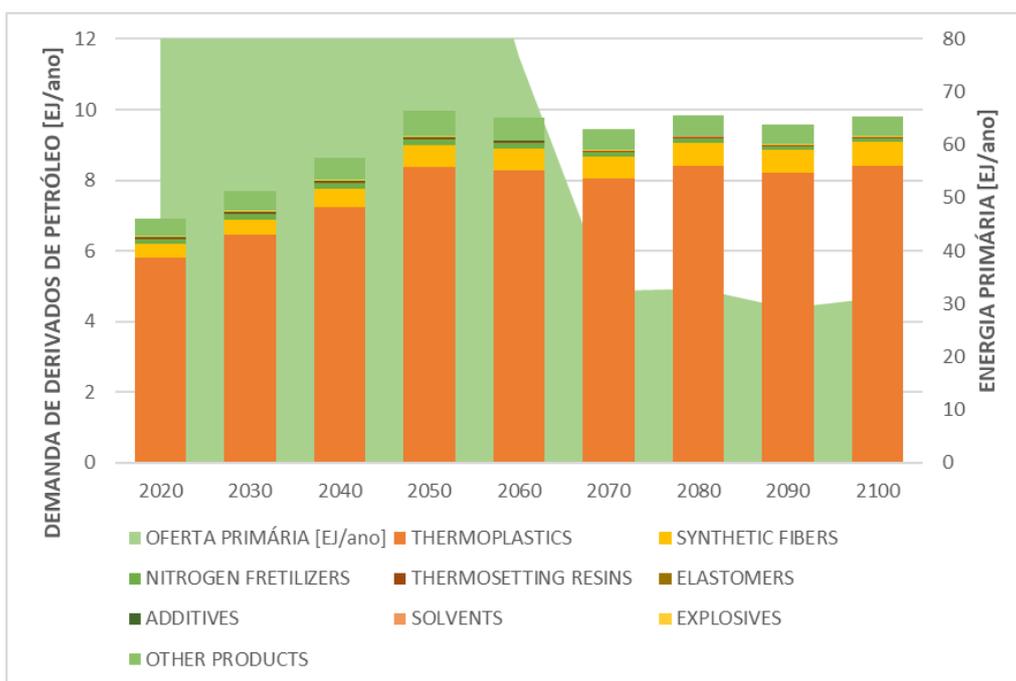


Figura A 24 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por aplicação– IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

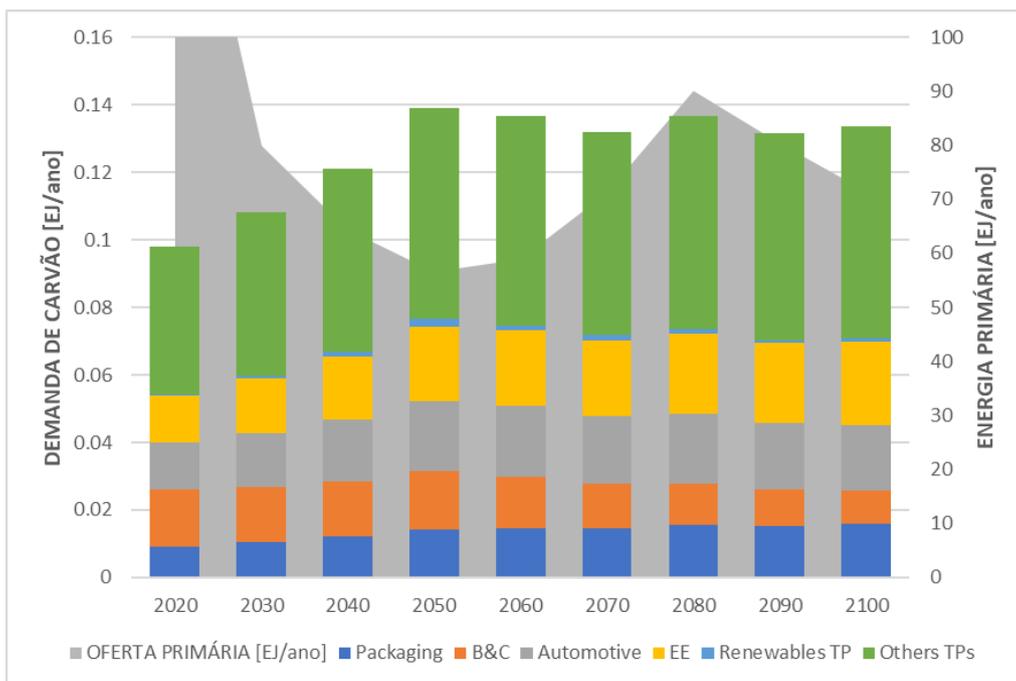


Figura A 25 – Demanda não-energética de carvão mineral para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-NEG

Fonte: Elaboração própria

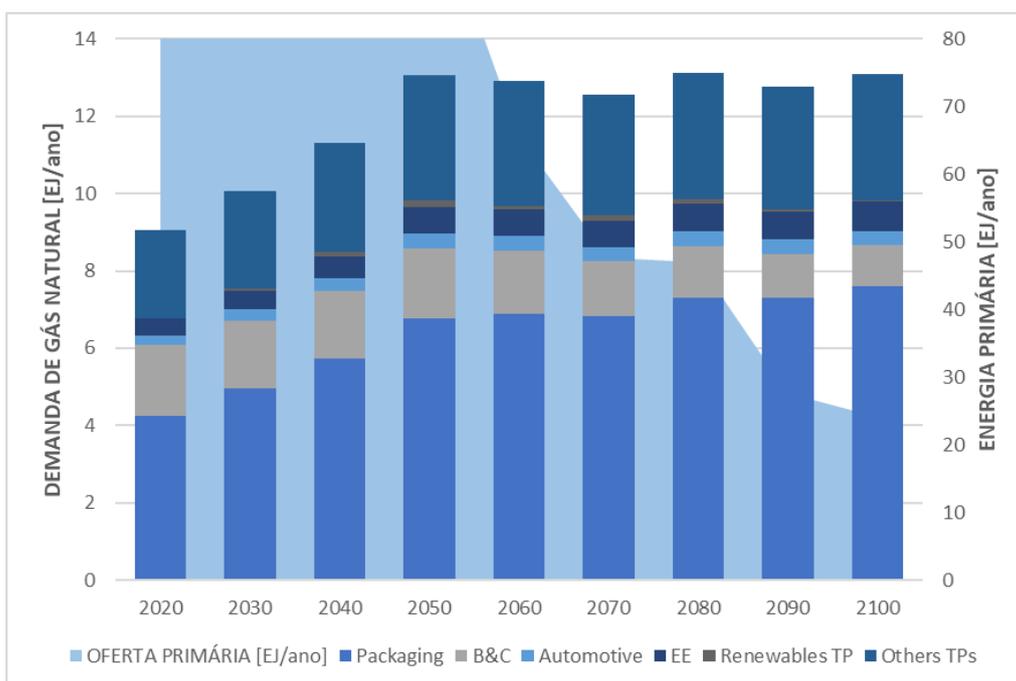


Figura A 26 – Demanda não-energética de gás natural para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

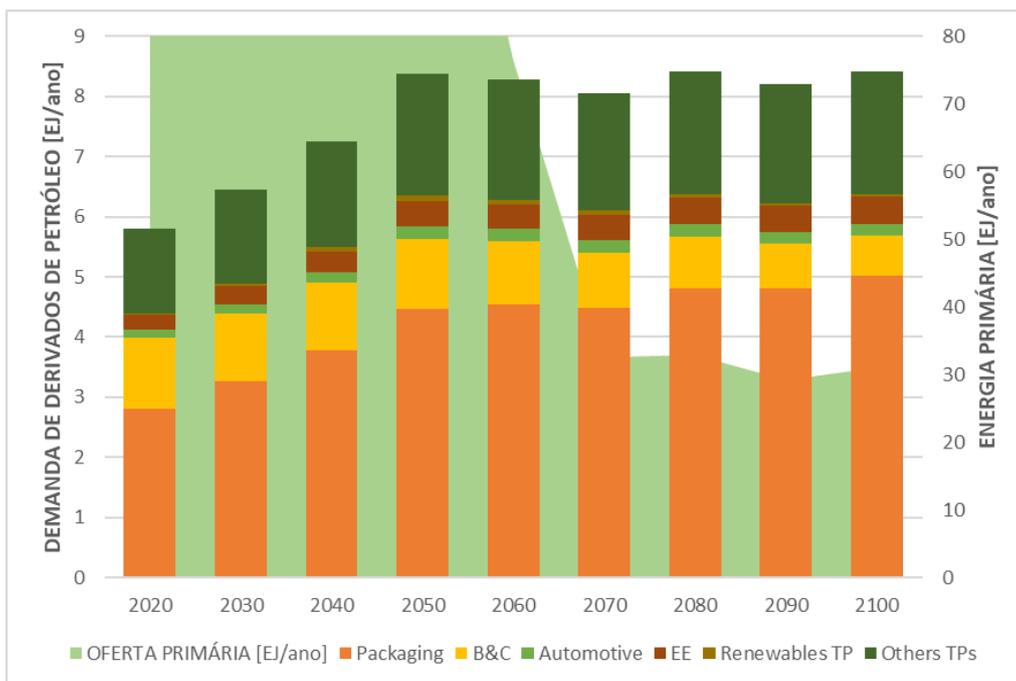


Figura A 27 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

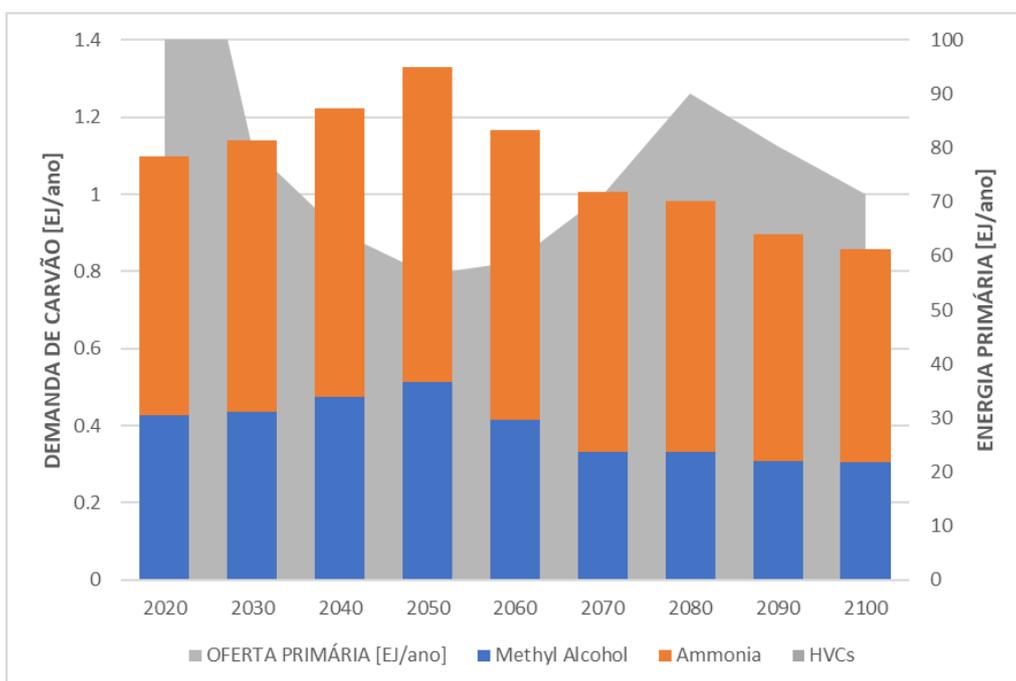


Figura A 28 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por químico básico – IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

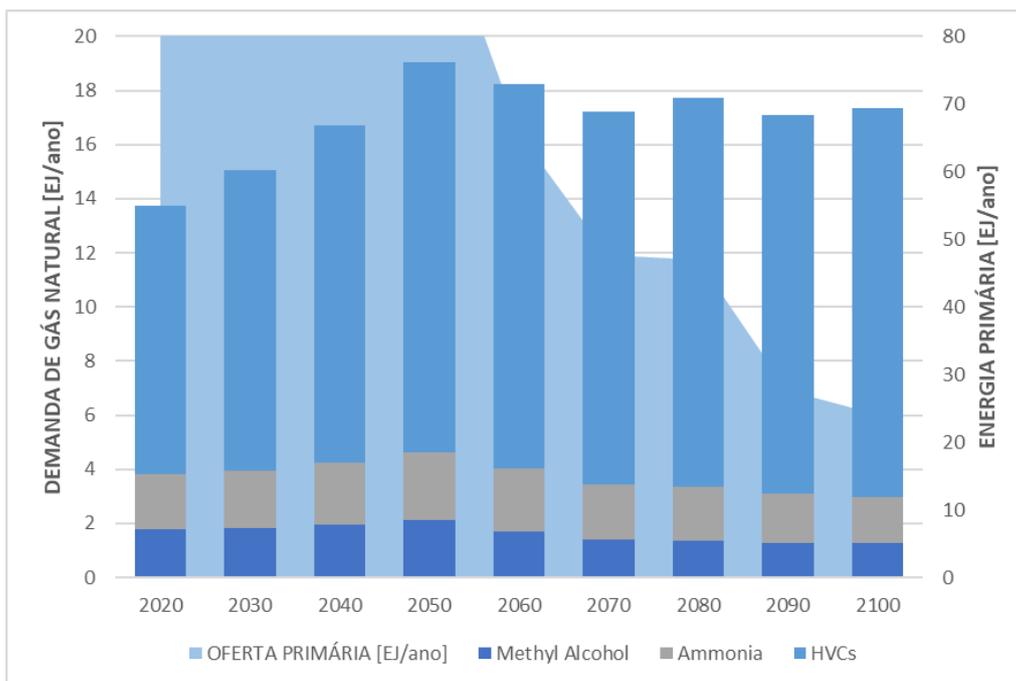


Figura A 29 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por químico básico – IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

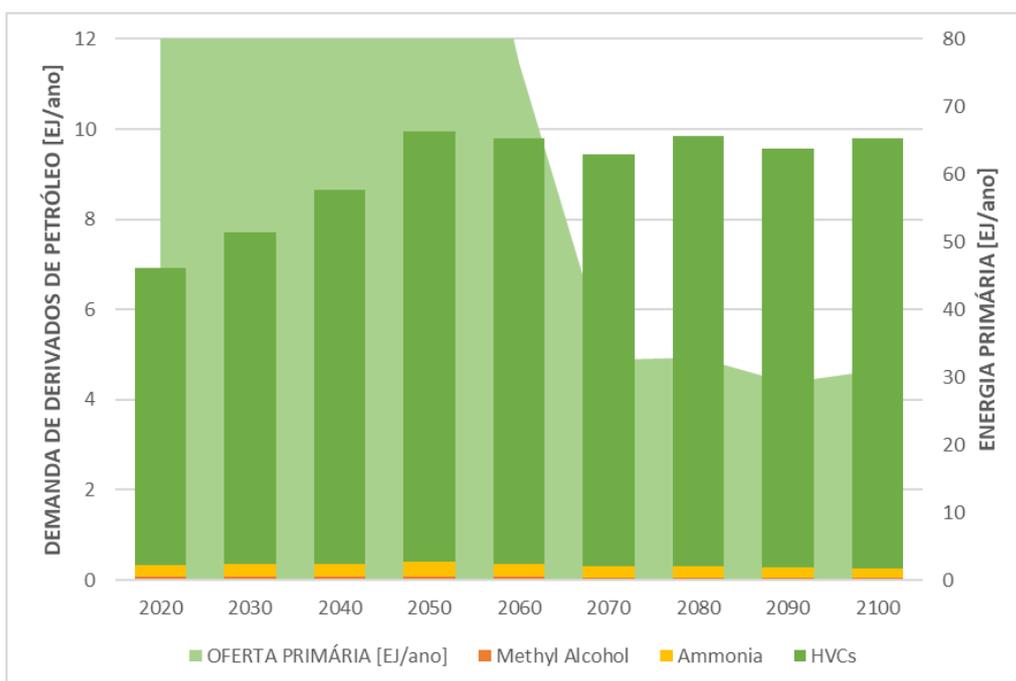


Figura A 30 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por químico básico – IMP-Neg

Fonte: Elaboração própria

II.4 IMP-SP

As próximas figuras apresentam os resultados de Demanda total não-energética de Carvão Mineral para o setor petroquímico, bem como as demandas para os três energéticos fósseis agrupadas por aplicação, setor de uso final (para produção de termoplásticos) e por químico básico para o IMP-SP.

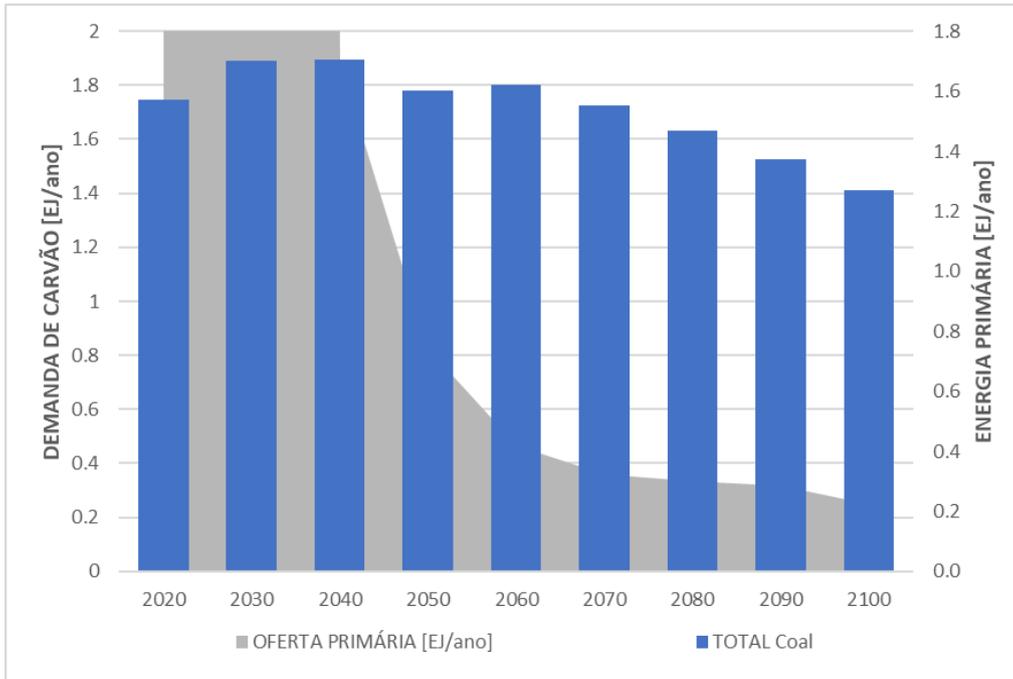


Figura A 31 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

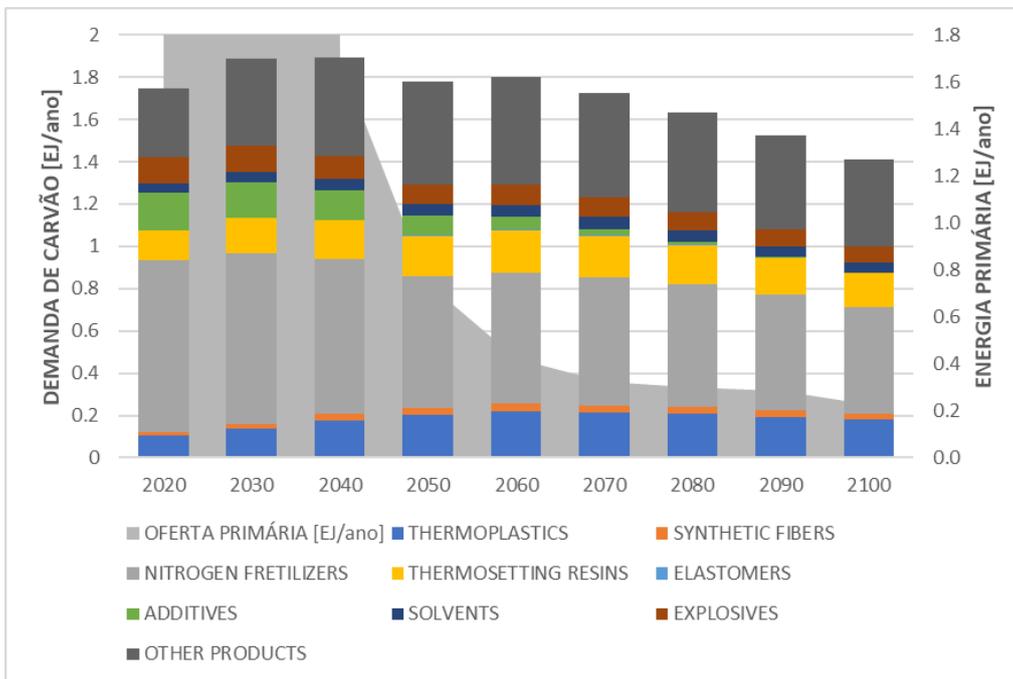


Figura A 32 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por aplicação– IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

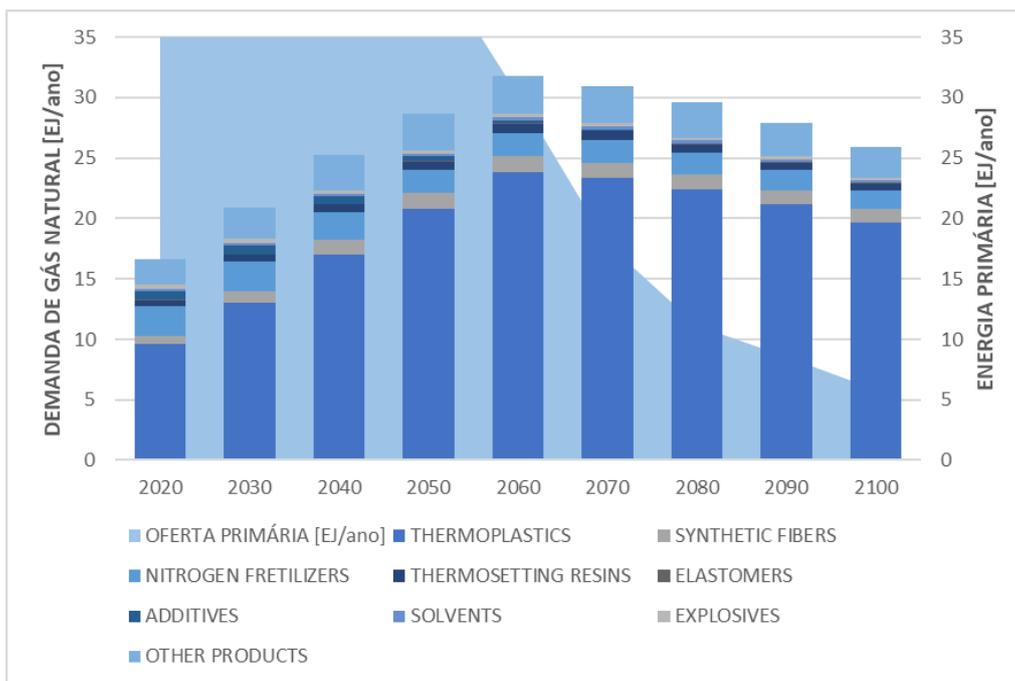


Figura A 33 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por aplicação– IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

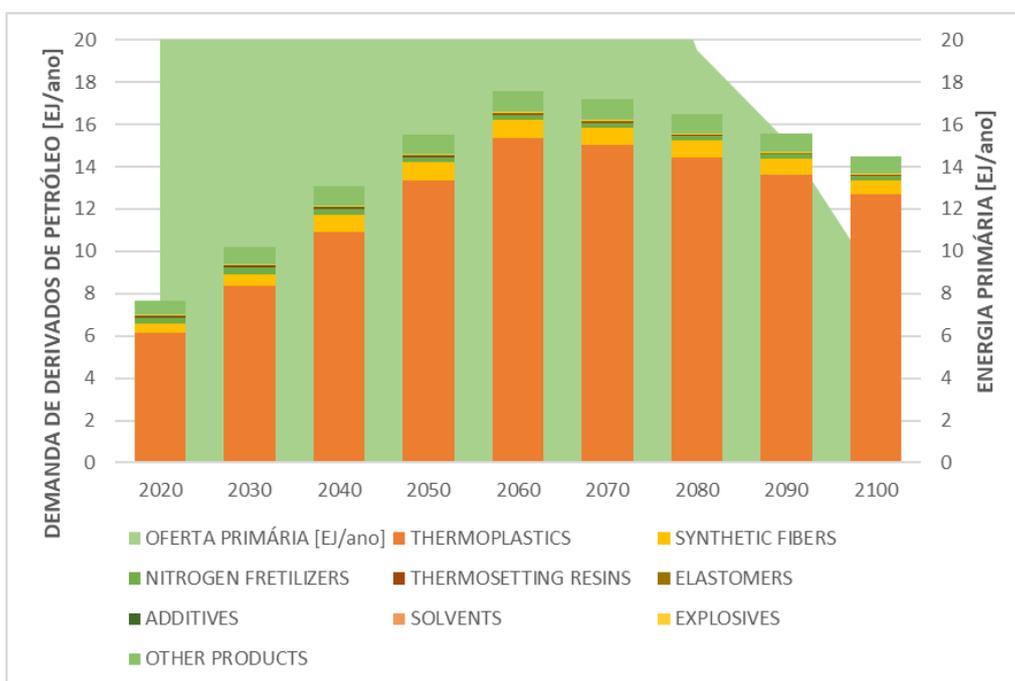


Figura A 34 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por aplicação– IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

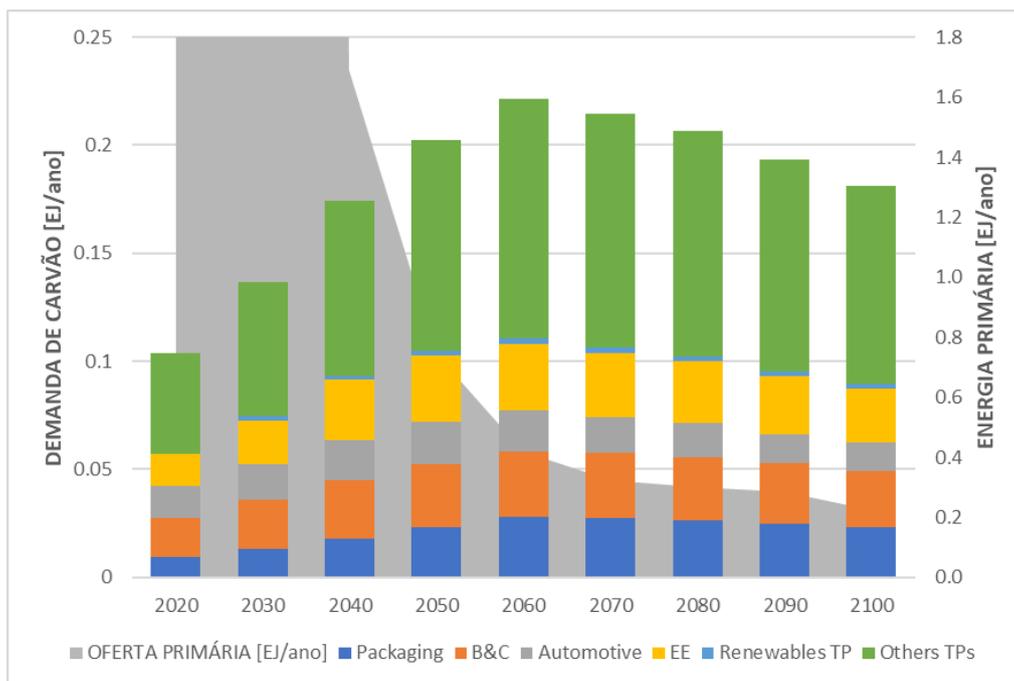


Figura A 35 – Demanda não-energética de carvão mineral para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

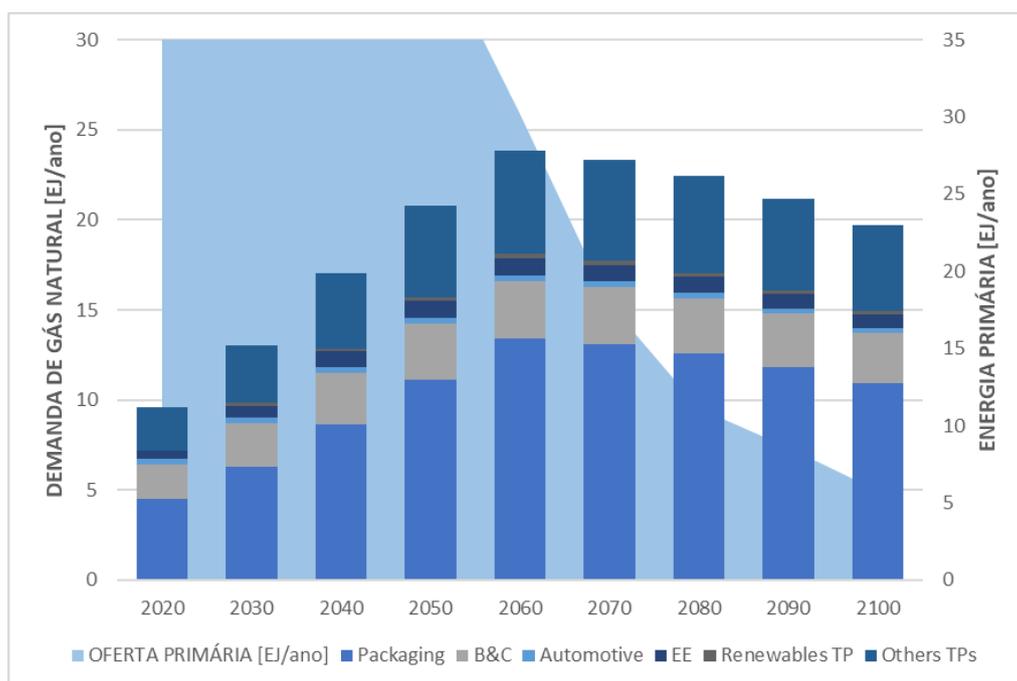


Figura A 36 – Demanda não-energética de gás natural para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

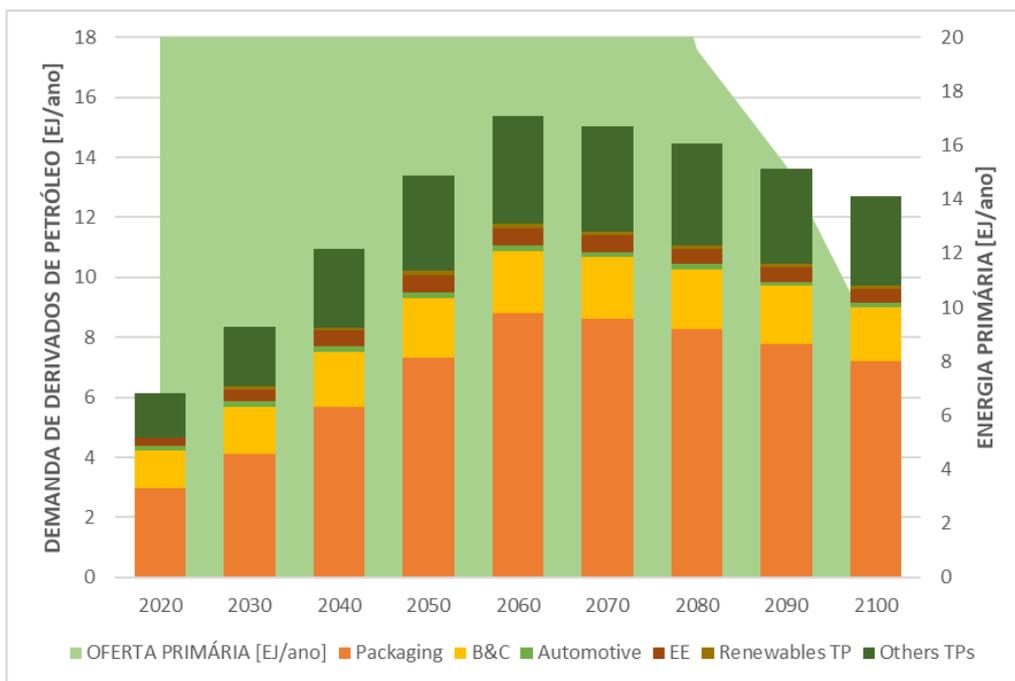


Figura A 37 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

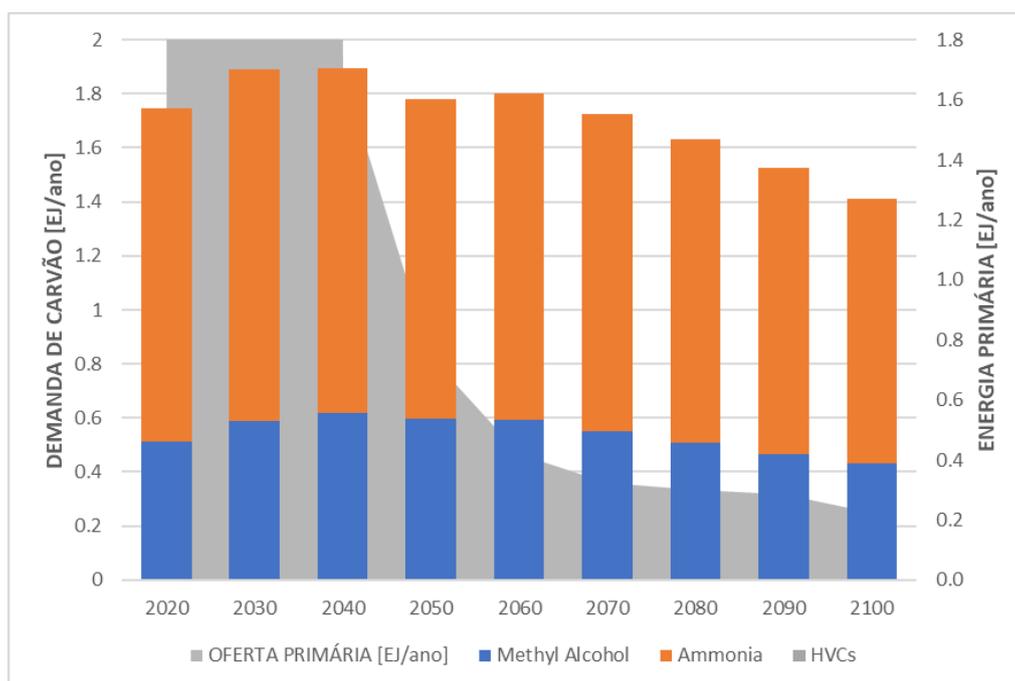


Figura A 38 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por químico básico – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

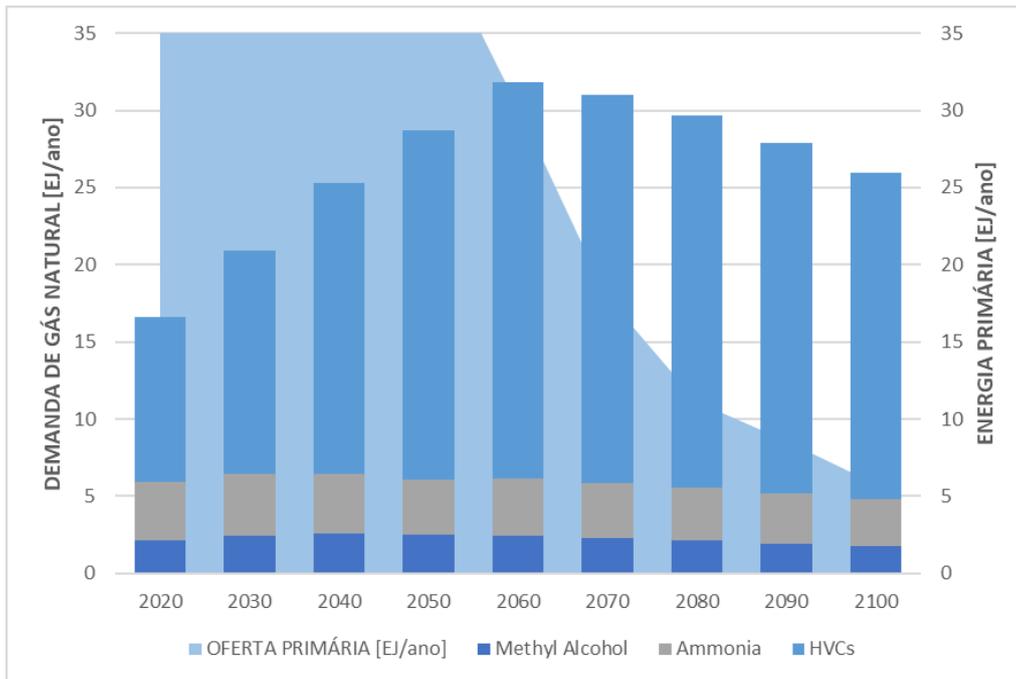


Figura A 39 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por químico básico – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

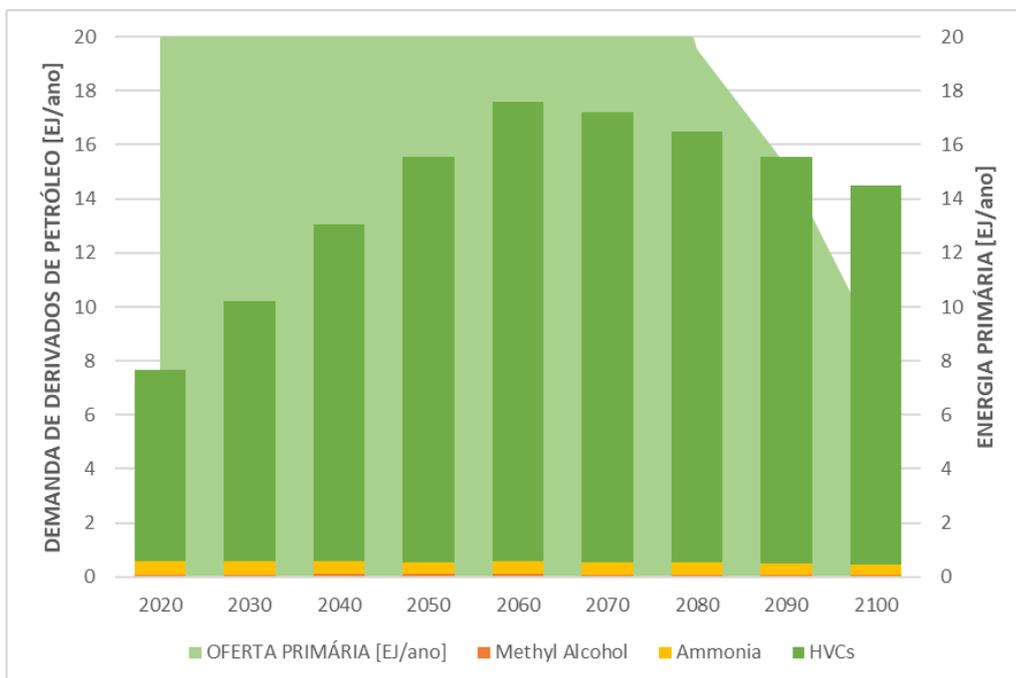


Figura A 40 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por químico básico – IMP-SP

Fonte: Elaboração própria

II.5 IMP-GS

As próximas figuras apresentam os resultados de Demanda total não-energética de Carvão Mineral para o setor petroquímico, bem como as demandas para os três energéticos fósseis agrupadas por aplicação, setor de uso final (para produção de termoplásticos) e por químico básico para o IMP-GS.

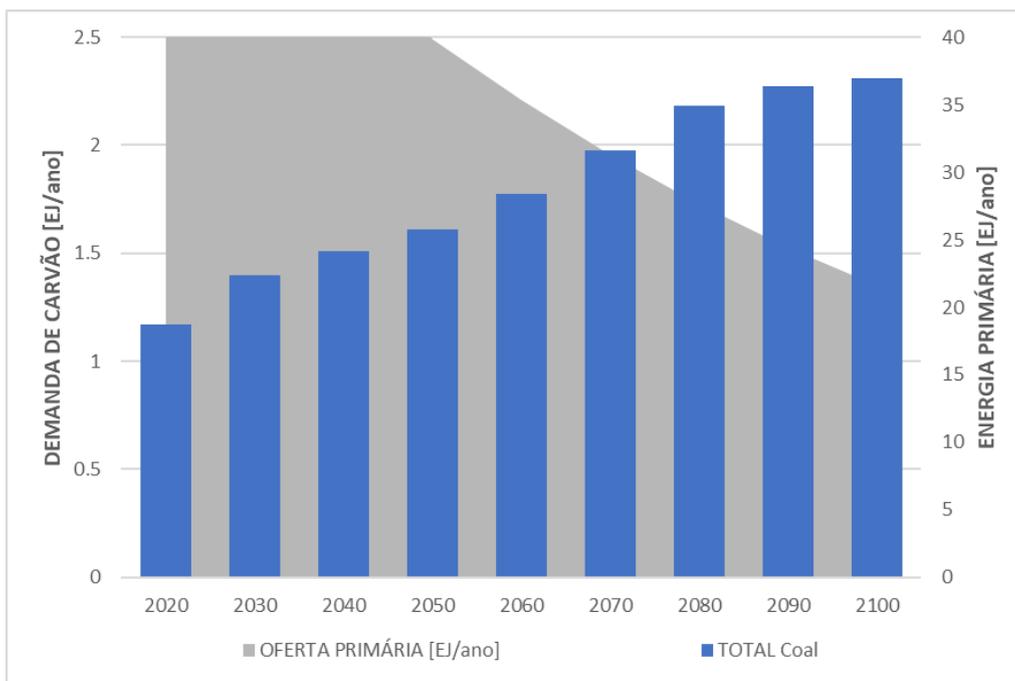


Figura A 41 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

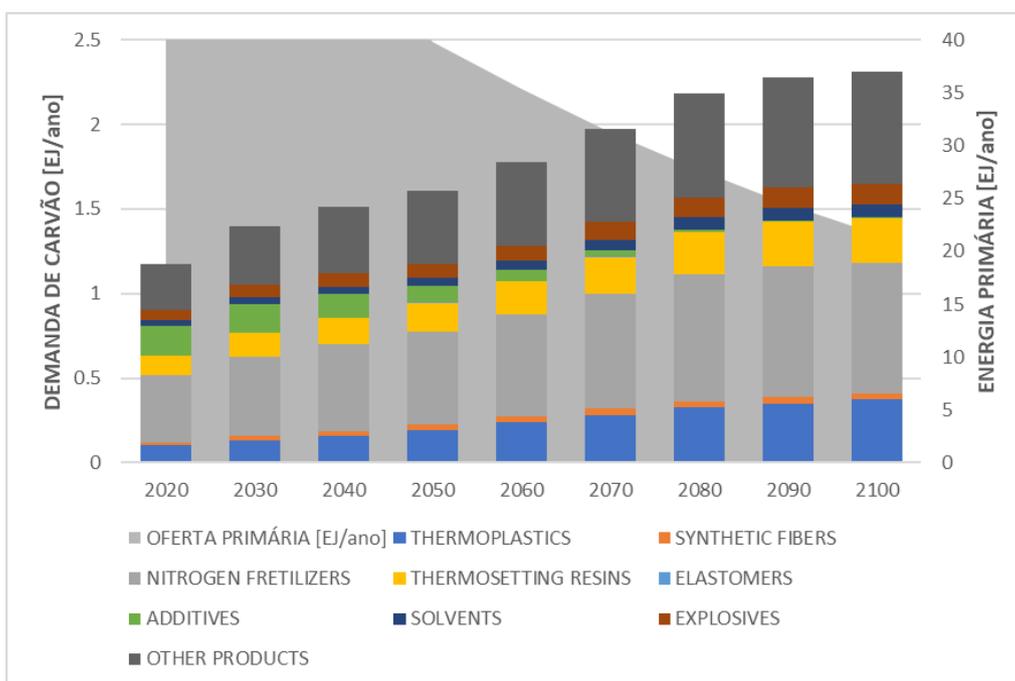


Figura A 42 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por aplicação– IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

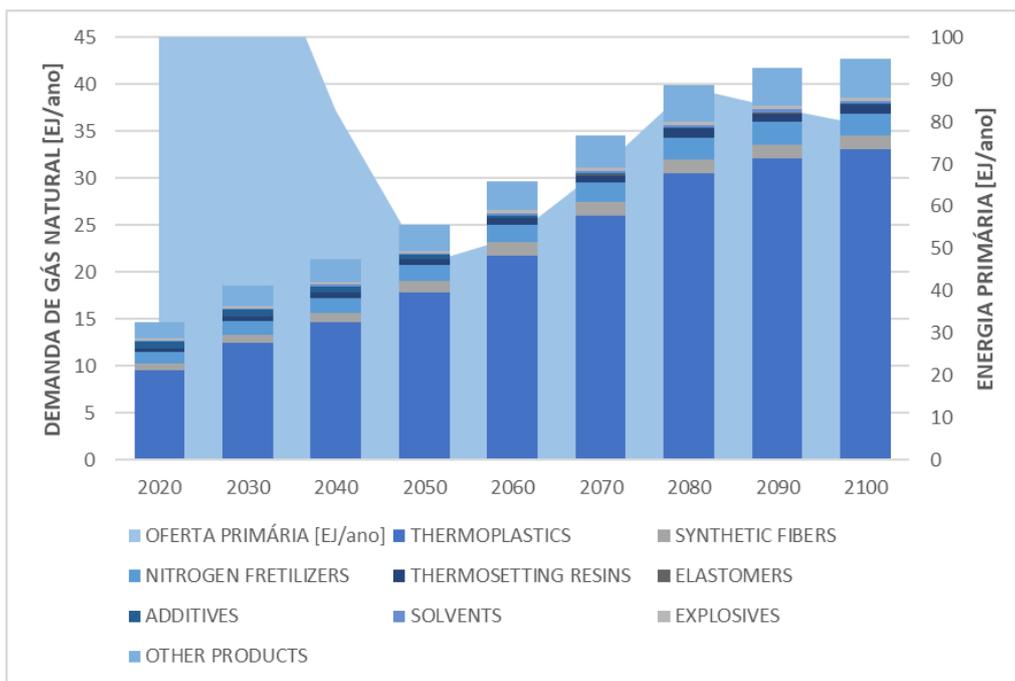


Figura A 43 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por aplicação– IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

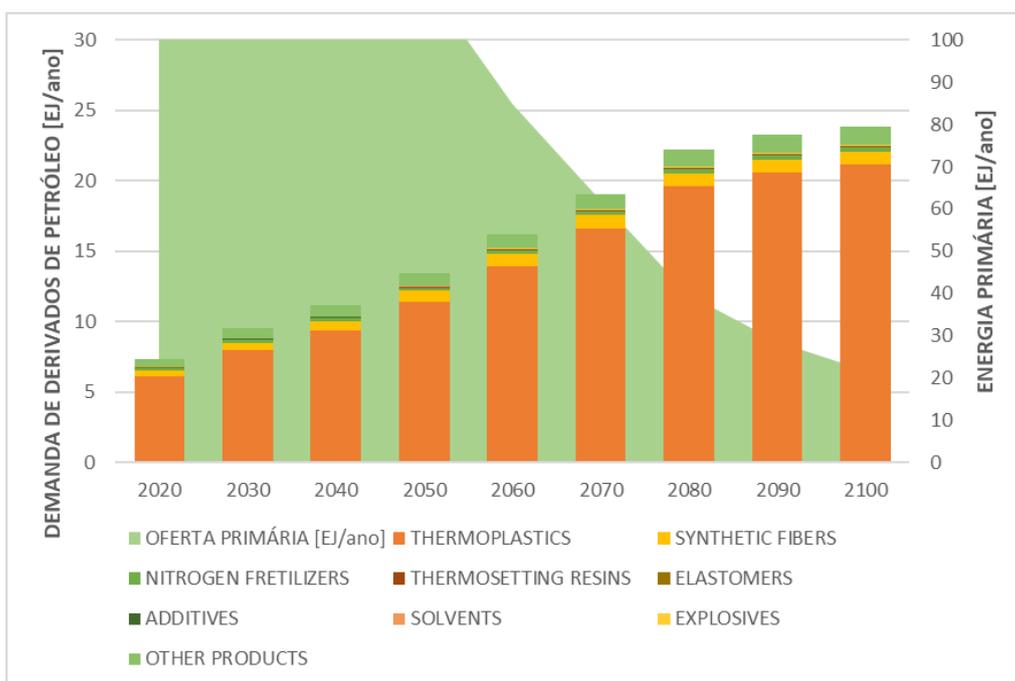


Figura A 44 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por aplicação– IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

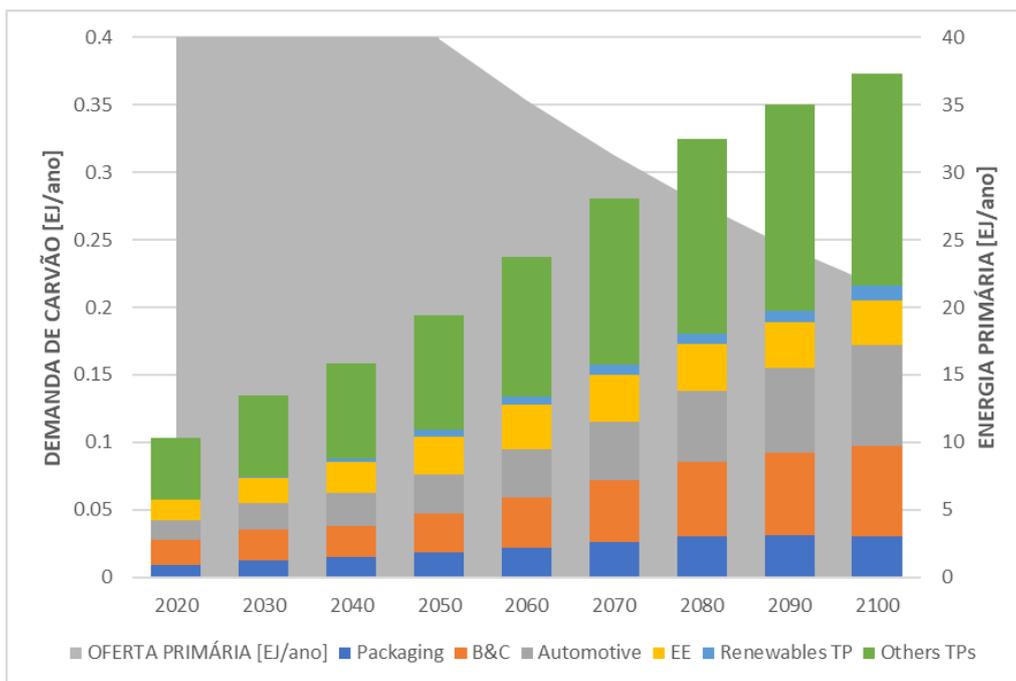


Figura A 45 – Demanda não-energética de carvão mineral para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

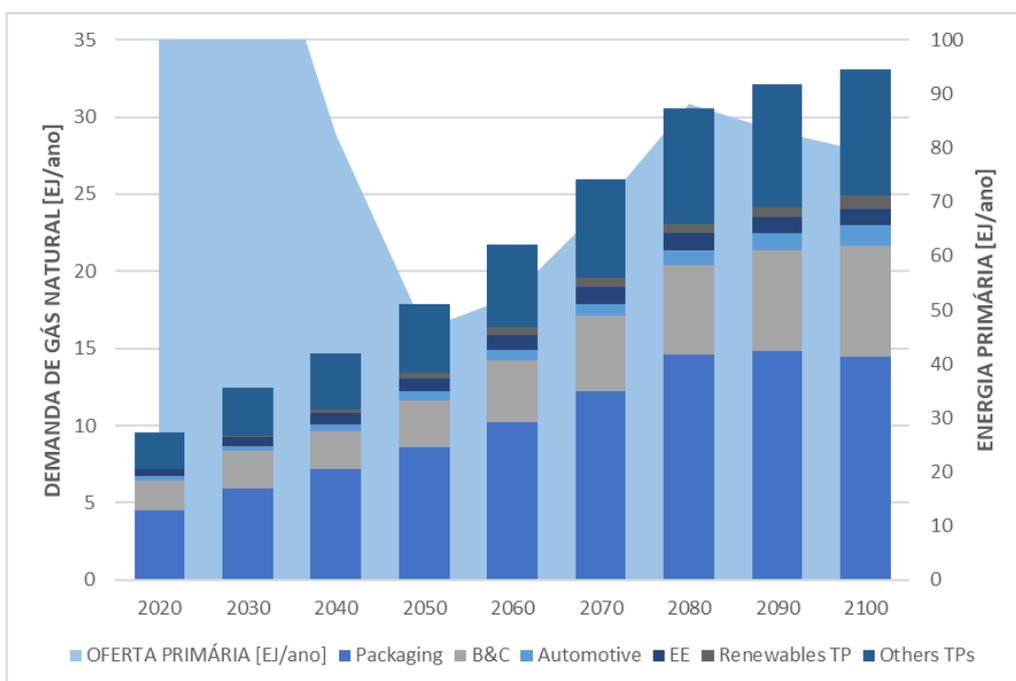


Figura A 46 – Demanda não-energética de gás natural para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

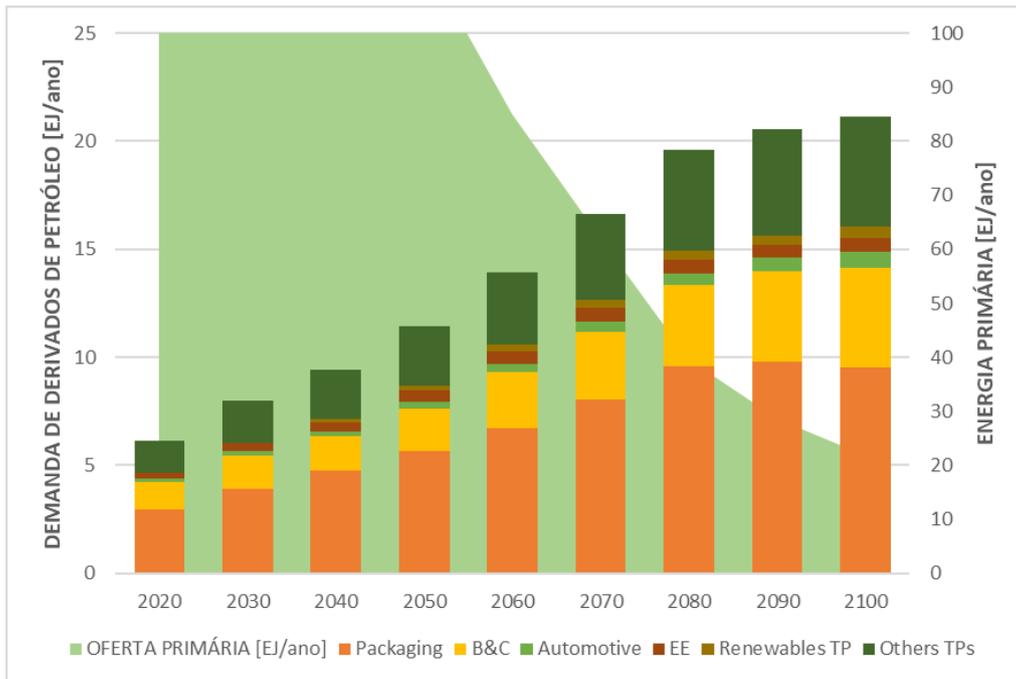


Figura A 47 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para produção de termoplásticos por setor de uso final – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

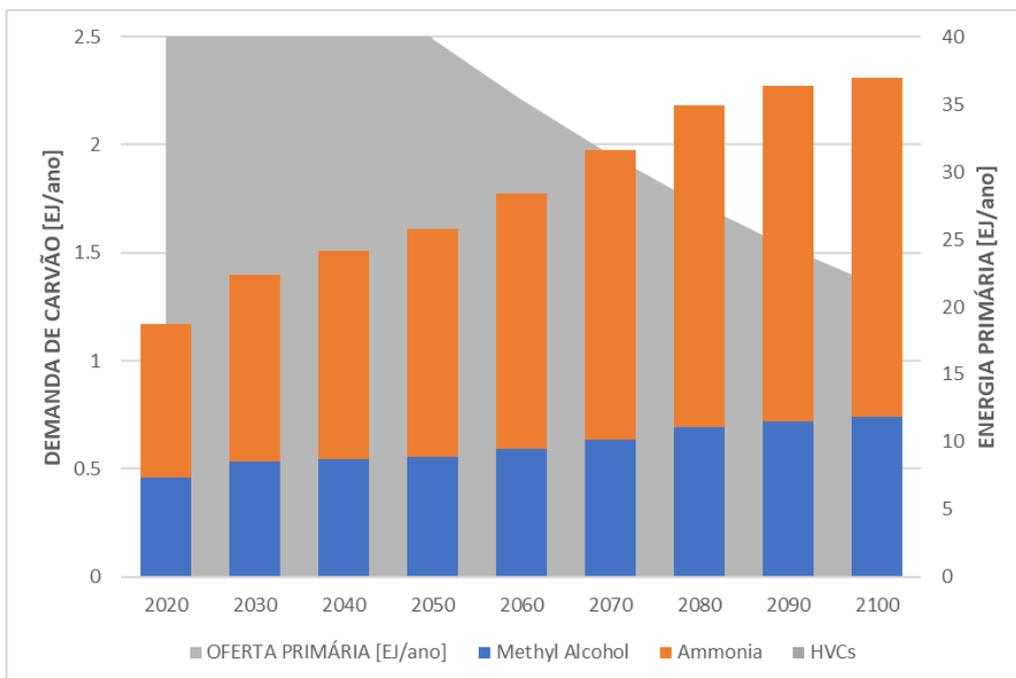


Figura A 48 – Demanda não-energética de carvão mineral para o setor petroquímico por químico básico – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

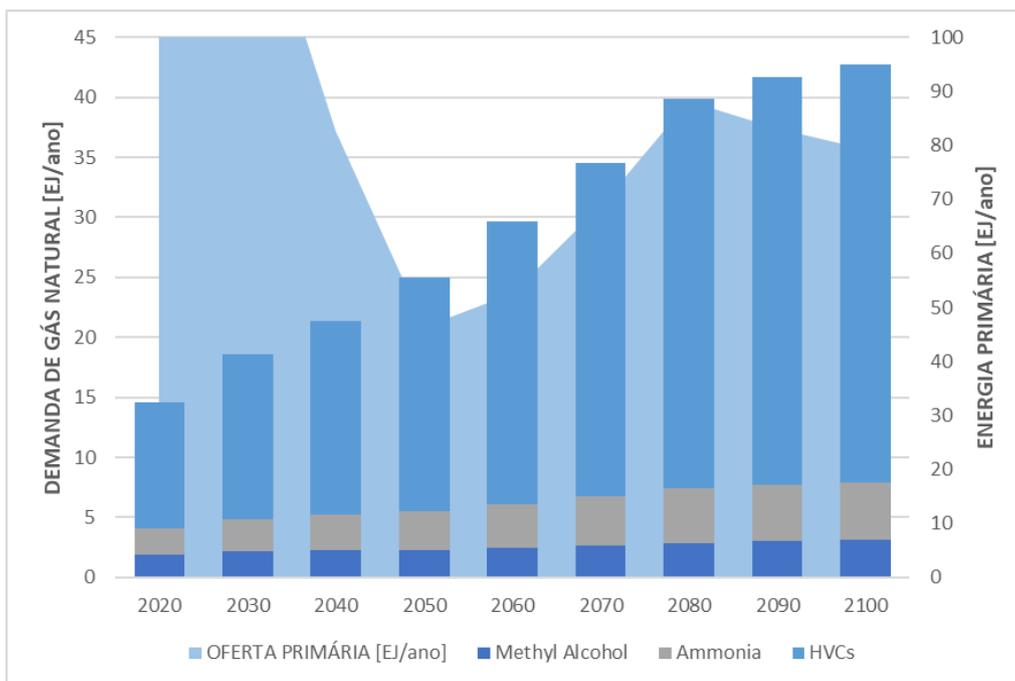


Figura A 49 – Demanda não-energética de gás natural para o setor petroquímico por químico básico – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria

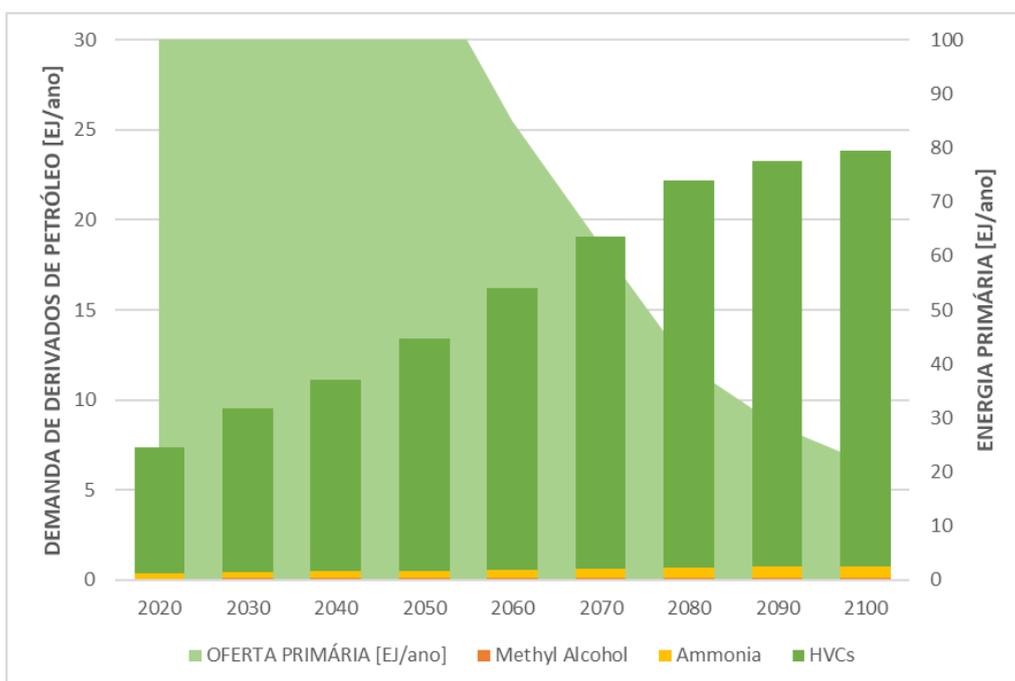


Figura A 50 – Demanda não-energética de derivados de petróleo para o setor petroquímico por químico básico – IMP-GS

Fonte: Elaboração própria